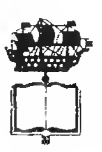
В. А. ПАВЛОВ

ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ,

ЕГО ПРОЯВЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ и ДОПОЛНЕННОЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «СУДОСТРОЕНИЕ» · ЛЕНИНГРАД · 1972

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разносторонние проявления гироскопического эффекта в различных отраслях народного хозяйства привлекают к нему с каждым годом все большее внимание советских людей и особенно нашей молодежи. Использование гироскопического эффекта особенно возросло в связи с успехами Советского Союза в освоении космического пространства.

Гироскоп в настоящее время является одним из основных элементов современных автоматизированных систем управления морскими судами, самолетами, космическими кораблями, планетоходами и многими другими подвижными объектами.

Гироскопические устройства позволяют уменьшить качку судна при волнении на море и колебания автомобиля при езде по неровной дороге, обеспечить устойчивое движение велосипедов, мотоциклов и мотороллеров, осуществить однорельсовую железную дорогу, создать двухколесный автомобиль и много других интереснейших машин.

Стремление рассказать нашей любознательной молодежи о природе гироскопического эффекта, его проявлениях

и способах практического использования и составляет цель настоящей книги. Два ее издания, вышедшие в свет в 1961 и 1967 гг., быстро разошлись. Многочисленные письма читателей побудили автора подготовить третье издание книги, в которое вошли новые разделы о нутационных колебаниях гироскопа, о проявлении гироскопического эффекта в живых организмах, об управляющем гироскопе вертолета, о гироскопических стабилизаторах биноклей, кино- и фотоаппаратов и о других применениях гироскопических приборов.

Автор приносит глубокую благодарность читателям за их письма, содержавшие замечания, направленные на улучшение книги, и выражает особую признательность проф. Е. Л. Смирнову, осуществившему рецензированне настоящего издания.

Новые замечания и пожелания по книге будут также приняты автором с искренней признательностью. Отзывы на книгу просьба направлять в издательство «Судостроение» по адресу: 191065, Ленинград, Д-65, ул. Гоголя, 8.

I

ПОЧЕМУ ТЕХНИКИ ЗАИНТЕРЕСОВАЛИСЬ ВОЛЧКОМ

1

Развитие мореплавания

С незапамятных времен для постройки своих жилищ выбирали наши предки высокие берега рек и озер. Вода привлекала человека и обилием рыбы, употреблявшейся в пищу, и возможностью легко перемещаться от одного стойбища к другому. По рекам были открыты пути на многие тысячи километров, и люди еще в глубокой древности научились использовать водные просторы для сообщения между отдельными племенами и народностями. Плавая по рекам и озерам, они отмечали наиболее характерные особенности берегов и по ним определяли пройденный путь. Населенные пункты, возвышенности и овраги, лесные массивы и отдельные деревья, слияния и разветвления рек служили человеку ориентирами для уточнения его местонахождения. Эти ориентиры передавались из одного поколения в другое, способствуя освоению речных путей.

Продвигаясь вдоль рек, люди выходили на морские просторы. Первоначально они плавали по морю лишь вдоль его берегов, отмечая на них наиболее характерные ориентиры. В тех случаях, когда естественных ориентиров на берегу не оказывалось, возводились искусственные сооружения, остатки которых до сих пор стоят на многих морских



побережьях. Особенно большое количество стариннейших мореходных ориентиров, созданных руками человека, в виде огромных груд валунов, башен, высоких крестов и других подобных им сооружений сохранилось на берегах наших северных морей.

Однако ограниченное продвижение по морю вдоль побережья не могло удовлетворить потребностей человека. Поиски рыбы, охота за морским зверем, торговля, военные походы заставляли уходить в открытое море, все дальше и дальше от родных берегов. Дошедшие до нас письменные документы и археологические находки говорят о том, что за несколько веков до нашей эры китайские мореплаватели проложили путь на Японские и Филиппинские острова, а индусские племена — на Борнео, Суматру и Яву. Народы Месопотамии, Египта, Палестины, Византии, Карфагена и Рима плавали по Средиземному, Красному и Аравийскому морям.

С первых же веков нашей эры на морях, омывающих берега Европы, начали появляться славяне. Как свидетельствуют исторические памятники VI — VII вв., уже в те времена славяне совершали неоднократные походы по Каспийскому морю в Персию и по Черному к его южным берегам и в Константинополь. Старинные летописи рас-

сказывают о походах и по Средиземному морю на остров Крит, в Италию и Андалузию.

Поморские славяне, поселившиеся на берегах Белого и Баренцова морей, совершали смелые походы и на Восток, и на Запад. Часто в поисках морского зверя охотники уходили в открытое море за сотни километров. В результате таких походов были проложены пути, начинавшиеся в Белом море, шедшие вокруг Скандинавии в Балтийское море, а через Югорский Шар и Карское море — в устье Оби.

Примерно в те же времена русские поморы через Баренцово море, которое они называли Студеным, проложили путь на Грумант (ныне о. Шпицберген), у берегов которого вели китобойный и тюлений промыслы. Смелые энергичные люди шли на освоение безбрежных просторов морей и океанов. Но чем дальше они уходили в открытое море, тем сложнее становилось определять местоположение корабля. Среди морских просторов уже не могли быть использованы береговые ориентиры, и для определения своего местоположения мореходам приходилось создавать специальные приборы.

2

Географические координаты

Какими же способами могло быть определено местоположение корабля в открытом море? Как известно, Земля, имея форму, близкую к форме шара (рис. 1), непрерывно вращается в мировом пространстве вокруг земной оси NS, проходящей через центр $O_з$ Земли и пересекающей земную поверхность в точках N северного и S южного географических полюсов.

Плоскость, проходящая через центр Земли $O_з$ перпендикулярно к земной оси NS, называется плоскостью

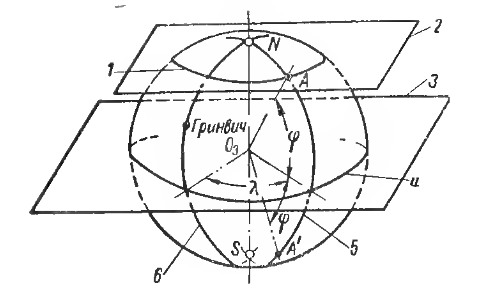


Рис. 1. Географические координаты.

1 — параллель, или широта, точки A; 2 — плоскость параллели; 3 — плоскость экватора; 4 — экватор; 5 — меридиан, или долгота, точки A; 6 — главный меридиан.

географического экватора. Она делит земной шар на северное и южное полушария. Линия пересечения плоскостью экватора земной поверхности носит название экватора. Если параллельно плоскости экватора провести вторую плоскость, носящую название плоскости параллели, то линию, образующуюся при ее пересечении с земной поверхностью, принято называть параллелью.

Через любую точку A на земной поверхности можно провести свою параллель, расстояние которой от плоскости экватора характеризуется углом φ широты данной точки, составляемым радиусом O_3A, проведенным из центра O_3 Земли в точку A, и плоскостью экватора. Надо иметь в виду, что углом φ измеряются широты двух точек: A и A', одна из которых расположена в северном, а другая в южном полушариях. Чтобы различать эти точки, широ́ты, лежащие между экватором и северным полюсом N, принято называть северными в отличие от южных широт, расположенных между экватором и южным географическим полюсом S.

Угол широты φ еще не дает определенного представления о местоположении точки A на земной поверхности, так как на такой же широте будут расположены все точки данной параллели. Чтобы уточнить положение точки A, земной шар мысленно рассекают плоскостью, проходящей че-

рез точку A и оба географических полюса N и S. Такая плоскость называется **плоскостью меридиана**, а линия пересечения ею земной поверхности — **меридианом** данной точки.

Положение меридиана точки A определяется углом λ географической долготы, отсчитываемым в восточном или западном направлениях от меридиана, который проходит через Гринвичскую астрономическую обсерваторию в Англии и условно называется **главным**. Таким образом, положение любой точки на земной поверхности определяется величинами двух углов φ и λ, являющихся ее географическими координатами. Следовательно, местоположение на земной поверхности какой-либо подвижной платформы, например корабля, будет точно определено, если будут известны географические координаты той точки земной поверхности, в которой корабль находится в данный момент времени.

3

Методы определения географических координат в открытом море

Солнце и звезды с давних времен являются естественными ориентирами для определения местоположения судна. Нам, находящимся на земной поверхности, все небесные светила кажутся как бы расположенными на окружающей земной шар небесной сфере (рис. 2), центр которой представляется совмещенным с центром Земли $O_з$. Точки P_N и P_S, в которых земная ось пересекает небесную сферу, получили название **северного** и **южного полюсов мира**.

Среди множества небесных светил имеются звезды, расположенные на небесной сфере в непосредственной бли-

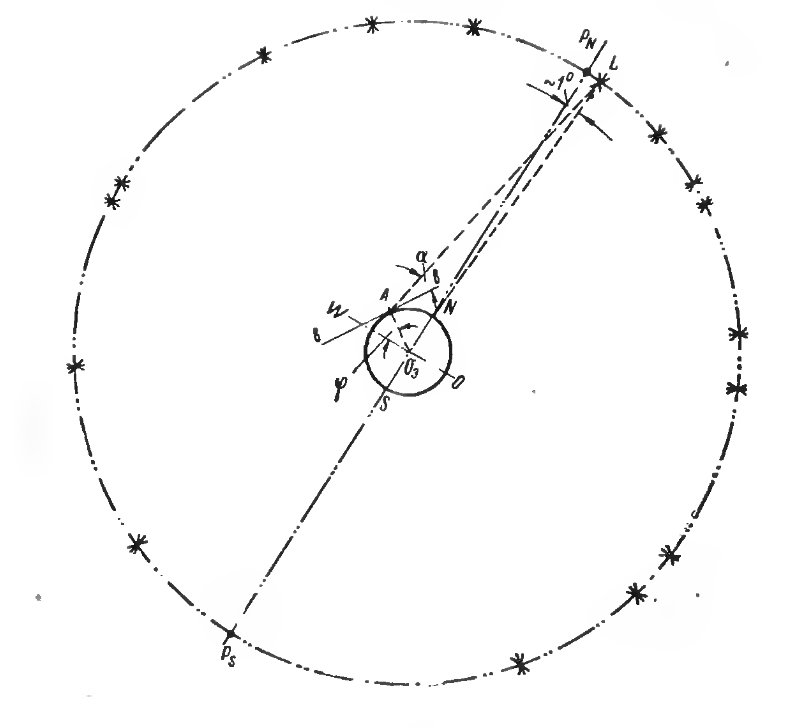


Рис. 2. К определению широты места.

зости от полюсов мира. Наиболее близкой к северному полюсу мира P_N является Полярная Звезда L. Луч $O_з L$, проведенный в ее направлении из центра Земли $O_з$, составляет с осью $P_N P_S$, называемой осью мира, угол около 1°. По положению Полярной Звезды над плоскостью горизонта, касательной к земному шару в выбранной точке A на его поверхности, мореплаватели и определяют в ночное время географическую широту судна.

Так как Полярная Звезда удалена от Земли на столь большое расстояние, что диаметр Земли по сравнению с расстоянием O_3L представляется точкой, то направление AL на Полярную Звезду из любого пункта A Земли практически можно считать параллельным оси мира P_NP_S. Тогда для определения географической широты φ точки A достаточно измерить угол α между направлением AL из точки A на Полярную Звезду L и плоскостью горизонта $Ав$. Действительно, вследствие взаимной перпендикулярности сторон O_3W и AL, а также O_3A и $Ав$ угол α, называемый **высотой светила**, практически будет равен углу φ географической широты местности.

В дневное время географическую широту местности определяют по Солнцу, измеряя в полдень его высоту над горизонтом. Метод вычисления широты в этом случае несколько сложнее, так как Земля изменяет свое положение относительно Солнца в зависимости от времен года, однако принцип определения широты и в этом случае аналогичен описанному выше.

По положению Солнца над горизонтом можно определить и географическую долготу местности. Известно, что полный оборот Земли вокруг ее оси происходит за 24 *ч*. В полдень, когда Солнце занимает наивысшее положение над горизонтом, местное время для данного меридиана *NAS* (рис. 3) соответствует 12 *ч*. В это мгновение на противолежащем меридиане, плоскость которого *NBS* составляет с плоскостью меридиана *NAS* угол в 180°, как раз полночь, и, следовательно, там местное время равно 24 *ч*.

Местное время для каждого меридиана отлично от времени любого другого меридиана. Если разница во времени между меридианами *NAS* и *NBS*, расположенными под углом 180°, равна 12 *ч*, то для меридиана *NDS*, составляющего с меридианом *NAS* угол, равный 1°, эта разница составит 4 *мин*. Таким образом, если местное время между двумя меридианами отличается на 4 *мин*, то их плоскости

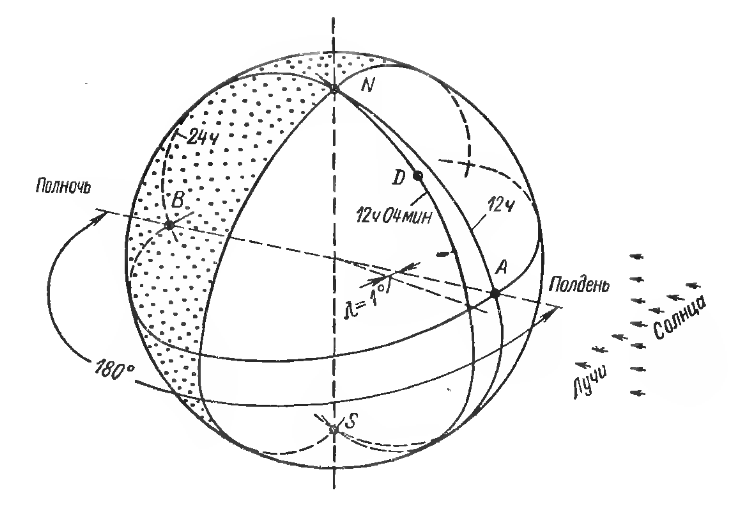


Рис. 3. К определению долготы места.

составляют между собой угол географической долготы λ, равный 1°.

Таковы в самых общих чертах способы, которыми с давних времен пользовались мореплаватели при определении географических координат корабля в открытом море. Правда, для определения угла α высоты светила (рис. 2) при отсутствии видимости горизонта на судне необходимо иметь площадку, неизменно сохраняющую горизонтальное положение. Если указанное требование сравнительно легко осуществимо в тихую погоду, то при сильном волнении, когда корабль непрерывно раскачивается, его выполнение связано с преодолением значительных трудностей.

Отсутствие на судне площадки, неизменно сохраняющей горизонтальное положение, приводило к большим ошибкам при вычислении географических координат судна, а подчас и совершенно исключало возможность их определения,

В результате команда теряла ориентировку и судно отклонялось от правильного курса.

Над разрешением важной проблемы создания горизонтальной площадки на качающемся корабле работали ученые нескольких поколений. Первые попытки сводились к устройству на корабле люльки с платформой, подвешенной на палубе в виде маятника (рис. 4). Центр тяжести платформы был размещен ниже осей подвеса люльки, благодаря чему независимо от качки судна платформа, казалось бы, должна была сохранять свое положение неизменно горизонтальным. В действительности же этого не достигалось.

Дело в том, что при качке корабля в опорах по осям подвеса платформы неизбежно возникают силы трения. При каждом наклоне палубы эти силы воздействуют на платформу, стремясь увлечь ее за кораблем и тем самым вывести из горизонтального положения. Простой опыт позволяет убедиться в сказанном. Возьмите валик *B* (рис. 5). Насадите на его конец втулку маятника *M* и проследите за тем, чтобы валик во втулке вращался свободно. Поворачивайте валик *B* вправо и влево вокруг оси *AA*, не касаясь самого маятника. Вы увидите, что последний также начнет раскачиваться вокруг оси *AA*.

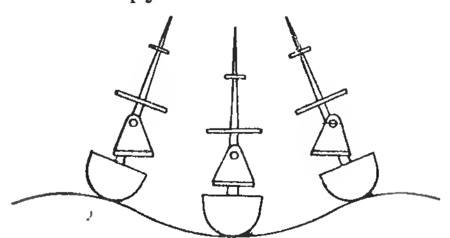


Рис. 4. Маятниковая платформа на корабле.

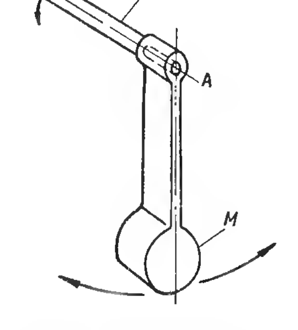


Рис. 5. Модель для демонстрации воздействия сил трения на маятник.

В плохую погоду, при волнении на море, подвешенная на корабле платформа, подобно маятнику в описанном опыте, начинала раскачиваться, создавая для определяющего географические координаты такие же затруднения, как и при работе непосредственно на палубе качающегося судна. Именно по этим причинам маятниковая платформа и не могла быть практически использована для указанных выше целей.

4

Волчок

Первые неудачи по созданию искусственного горизонта заставили ученых и изобретателей искать новые пути определения географических координат в открытом море при любой погоде. В процессе этих поисков внимание ученых привлекла древнейшая народная игрушка — волчок, представляющая собой диск, закрепленный на тонкой заостренной ножке (рис. 6). На ножку волчка обычно наматывали тонкую бичевку и, быстро сдергивая ее, сообщали волчку вращение вокруг оси AA. Это вращение продолжалось до тех пор, пока возникающие в точке O опоры волчка силы трения о какое-либо основание не прекращали его движение.

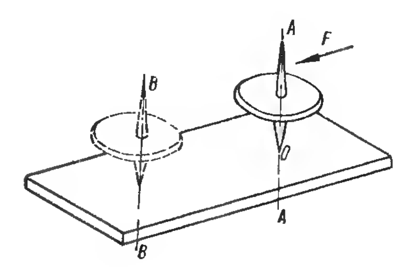


Рис. 6. Волчок.

Характерно, что попытки повалить быстро вращающийся волчок на бок не приносили результатов. Под действием толчка в направлении силы F волчок лишь отскакивал в сторону, продолжая вращаться вокруг оси BB, положение которой хотя и несколько смещалось относительно

первоначального направления AA, но оставалось ему параллельным.

Удивительное свойство волчка сохранять неизменным направление оси AA своего вращения открывало широкие перспективы для его практического использования. В самом деле, если быстро вращающийся волчок, выполненный в виде диска, неизменно выдерживает вертикальное положение, то вращение диска будет происходить строго в горизонтальной плоскости. Тем самым возникала непосредственная возможность практического осуществления искусственного горизонта.

Изучением свойств волчка занимались многие ученые мира: и И. Ньютон (1642—1727), и Ж. Даламбер (1717—1783), и член Российской академии наук Л. Эйлер (1707—1783). Именно Л. Эйлер в 1765 г. впервые систематизированно изложил теорию движения твердого тела около неподвижной точки его опоры и тем самым создал научную базу для дальнейшего более глубокого изучения законов движения волчка. Последовавшие затем работы Ж. Лагранжа (1736—1813), П. Лапласа (1749—1827), Л. Пуансо (1777—1859) и С. Пуассона (1781—1840) во многом содействовали дальнейшему изучению и разработке методов практического использования свойств быстро вращающегося волчка.

5

Секстан Флерие

В 1886 г. французский адмирал Флерие предложил новый прибор для определения географической широты местоположения корабля во время шторма и в других случаях отсутствия видимости горизонта. Основой прибора, получившего название с е к с т а н, являлся быстро вращающийся волчок B цилиндрической формы (рис. 7), подпертый остроконечной шпилькой на топке N.

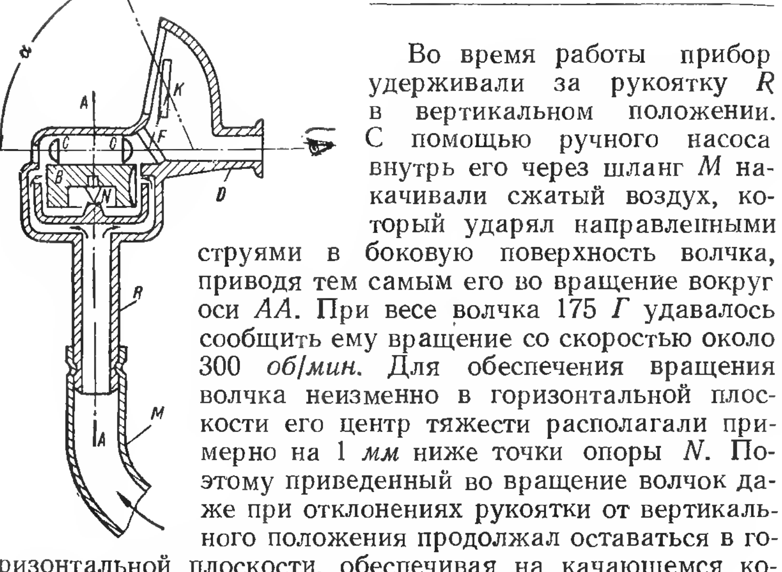


Рис. 7. Секстан Флерие.

Во время работы прибор удерживали за рукоятку *R* в вертикальном положении. С помощью ручного насоса внутрь его через шланг *M* накачивали сжатый воздух, который ударял направленными струями в боковую поверхность волчка, приводя тем самым его во вращение вокруг оси *AA*. При весе волчка 175 *Г* удавалось сообщить ему вращение со скоростью около 300 *об/мин*. Для обеспечения вращения волчка неизменно в горизонтальной плоскости его центр тяжести располагали примерно на 1 *мм* ниже точки опоры *N*. Поэтому приведенный во вращение волчок даже при отклонениях рукоятки от вертикального положения продолжал оставаться в горизонтальной плоскости, обеспечивая на качающемся корабле искусственный горизонт.

Для удобства фиксирования плоскости горизонта на верхней торцовой поверхности волчка были укреплены две плоско-выпуклые линзы *C*, на плоских поверхностях которых нанесены тонкие штрихи, расположенные параллельно торцовой поверхности волчка. Расстояние между линзами *C* соответствовало фокусному, вследствие чего при вращении волчка *B* штрихи, нанесенные на линзах, для глаза, наблюдающего в окуляр *D* прибора, сливались в одну черту. Эта черта, параллельная плоскости вращения волчка, и фиксировала положение плоскости горизонта, по отношению к которой измерялся угол α высоты светила *L*, аналогично описанному выше (см. рис. 2) методу измерения угла α при неподвижном основании.

Для одновременного наблюдения за линией искусственного горизонта и светила в приборе были установлены два зеркала: *F* и *K*. Поворотом зеркала *K* луч, идущий от светила *L*, совмещали с линией искусственного горизонта. При этом величина угла α определялась углом поворота зеркала *K*. Такова вкратце схема первого прибора, в котором замечательные свойства волчка получили практическое использование.

6

Волчок в кардановом подвесе

Несмотря на создание первых образцов приборов, в которых использовались свойства волчка, широкое практическое его применение для решения задач мореплавания все еще задерживалось. Причина заключалась в том, что при наклоне площадки вращающийся на ней волчок (рис. 8), сохраняя неизменным направление оси *AA* своего вращения, начинал сползать с площадки в сторону ее наклона. Указанное перемещение точки *O* опоры волчка на площадке, происходящее под воздействием веса волчка, и являлось препятствием для практического его использования.

Только в 1852 г. знаменитому ученому-физику Л. Фуко (1819—1868) удалось осуществить с помощью двух так называемых карданов ых колец такой подвес (рис. 9), который обеспечивал постоянство положения его точки опоры относительно основания. Применение карданова подвеса позволило придать волчку форму массивного ротора *P*, свободно вращающегося на опорах вокруг так называемой главной оси *AA* его подвеса во внутреннем кольце *BK*. Кольцо *BK* в свою очередь монтировалось в наружном кардановом кольце *HK* с помощью опор, расположенных по оси *BB*. Благодаря такому подвесу ротору *P* совместно с кольцом *BK* обеспечивалась свобода враще-

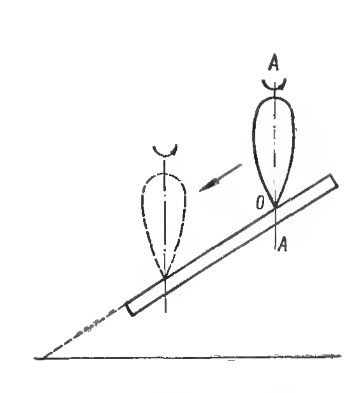


Рис. 8. Смещение волчка в сторону наклона основания.

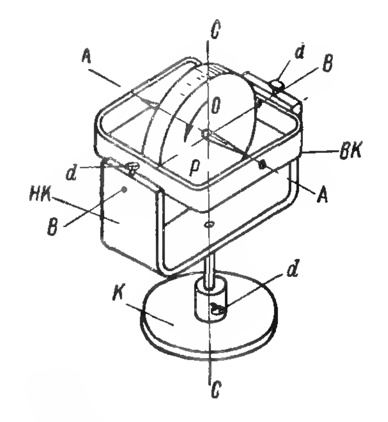


Рис. 9. Волчок в кардановом подвесе.

ния вокруг внутренней оси *BB* подвеса в наружном кольце *НК*. Наконец, наружное кольцо с помощью опор, расположенных по оси *CC*, монтировалось в корпусе *K* прибора. Тем самым ротору *P* с кольцами *ВК* и *НК* обеспечивалась свобода вращения вокруг наружной оси подвеса *CC*.

Сравнивая схему волчка в кардановом подвесе (рис. 9) с элементарным волчком (рис. 8), легко убедиться в том, что они действуют по одному и тому же принципу. В обоих случаях волчки обладают одной-единственной неподвижной точкой *O*, являющейся точкой их опоры. Отличие между ними заключается лишь в характере связи между волчком и основанием. Если у элементарного волчка эта связь не удерживающая, а позволяющая его точке опоры *O* перемещаться относительно основания, то у волчка в кардановом подвесе его связь с основанием удерживающая, не допускающая перемещений точки опоры *O* относительно основания, т. е. корпуса *K* прибора.

Описанная конструкция волчка в кардановом подвесе сохранилась до наших дней в виде лабораторного прибора. С помощью такого прибора обычно демонстрируют замечательные свойства волчка, причем для возможности лишения волчка свободы вращения относительно внутренней BB или наружной CC осей подвеса прибор снабжают стопорными винтами d.

II

ПРИРОДА ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

7

Гироскоп и его основные свойства

Опыты, проведенные с волчком, подвешенным в корпусе K с помощью двух кардановых колец BK и HK (см. рис. 9), показали, что новый прибор обладает такими же свойствами, которые присущи и элементарному волчку. При сообщении его ротору P вращения вокруг оси AA с достаточно большой угловой скоростью легко наблюдать за неизменным положением этой оси в пространстве. Более того, нетрудно заметить, что прибор оказывает значительное противодействие любым попыткам изменить его положение.

Подействуйте на наружное кольцо HK силой F (рис. 10), пытаясь повернуть прибор вокруг оси CC, и вы сразу же убедитесь в безрезультатности такой попытки. Прибор, оказывая сопротивление внешнему усилию F, начнет уклоняться от него в сторону, поворачиваясь вокруг оси BB в направлении, указанном стрелкой. При этом скорость рассматриваемого отклонения будет тем выше, чем больший момент относительно точки O создает усилие F.

Таким образом, чем меньшие моменты относительно точки O подвеса волчка создают воздействующие на него внешние силы, тем точнее ось AA его собственного вращения сохраняет свое направление в пространстве. Именно

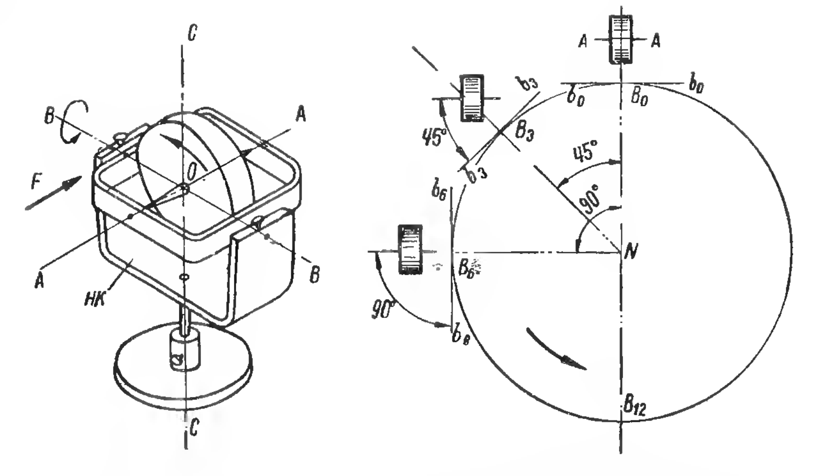


Рис. 10. К объяснению сопротивляемости быстро вращающегося волчка внешним усилиям.

Рис. 11. Отклонение гироскопа с течением времени от плоскости горизонта.

это свойство и открывало интереснейшие перспективы практического использования быстро вращающегося волчка.

Представим себе, что мы наблюдаем из мирового пространства за земным шаром со стороны его Северного полюса N (рис. 11). Предположим также, что в начальный момент времени мы увидели волчок установленным на экваторе в точке B_0, причем его главная ось AA направлена с запада на восток и расположена горизонтально.

Вследствие суточного вращения Земли точка B_0 непрерывно изменяет свое положение в пространстве. По прошествии трех часов она переместится в точку B_3, через шесть часов — в точку B_6, через двенадцать — в точку B_{12} и т. д., пока вновь не вернется в исходное положение по истечении 24 часов. Плоскость горизонта в любой точке

земной поверхности перпендикулярна к радиусу земного шара. Поэтому для наблюдающего из мирового пространства ее положение для точки земной поверхности, расположенной на экваторе, будет казаться прямой линией. Так, в точке B_0 это будет прямая b_0b_0, в точке B_3 — прямая b_3b_3, в точке B_6 — прямая b_6b_6 и т. д. Как видим, плоскость горизонта непрерывно с течением времени изменяет свое положение в пространстве.

В суточном вращении Земли участвует и точка подвеса волчка, закрепленная с помощью кардановых колец неподвижно на земной поверхности. Однако главная ось AA такого волчка не сохранит неизменного положения относительно плоскости горизонта. Оставаясь неподвижной в мировом пространстве, она постепенно начнет отклоняться от плоскости горизонта, причем угол этого отклонения будет равен углу поворота земного шара.

Следовательно, наблюдатель, находящийся на земной поверхности рядом с волчком в кардановом подвесе, сможет по отклонению его главной оси от плоскости горизонта определить угол поворота земного шара вокруг своей оси. Как видим, прибор Фуко дал возможность вести непосредственное наблюдение за суточным вращением Земли, почему и был назван гироскопом[1].

У гироскопа одновременно с описанными выше были обнаружены и другие не менее интересные свойства. Опыты показали, что, затягивая винты d, расположенные на наружном кольце $НК$ (см. рис. 9) и лишая тем самым гироскоп свободы вращения вокруг оси BB, создают условия, при которых гироскоп будет стремиться совместить свою главную ось AA с плоскостью меридиана. Для этого необходимо установить предварительно ось AA в плоскость горизонта. Таким образом, при соблюдении указанных условий получают возможность использовать гироскоп в качестве компаса, фиксирующего направление меридиана.

---

[1] От греч. γυρος (гирос) — вращение и σκοπεω (скопео) — смотреть.

Если же затянуть винт d, расположенный на корпусе K прибора, и лишить тем самым гироскоп свободы вращения вокруг оси CC, то его главная ось AA, при условии предварительного ее совмещения с плоскостью меридиана, будет стремиться занять положение, параллельное оси мира $P_N P_S$ (см. рис. 2). В этом случае с помощью гироскопа представляется возможным измерять угол φ географической широты местности.

Для уяснения физической сущности описанных свойств гироскопа обратимся к некоторым основным понятиям и законам механики.

8

Некоторые сведения из механики

Удивительное, на первый взгляд, свойство гироскопа двигаться в направлении, перпендикулярном к действующему на него усилию, полностью подчинено законам механики. Оно объясняется инертностью массы гироскопа, присущей ему, как и любому другому телу.

Наблюдения и опыты показывают, что изменение скорости и направления движения тела не может происходить само по себе без воздействия на него внешних сил. Согласно закону Ньютона каждое тело, если на него не действуют другие тела, сохраняет состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения.

Свободно двужущееся тело A (рис. 12) стремится сохранить свое движение с постоянной скоростью v в прямолинейном направлении ab. На схеме скорость v изображена вектором в виде отрезка прямой nl, совпадающей с направлением движения ab. Стрелка на конце вектора указывает, в какую сторону по этому направлению движется тело. Длина nl вектора в условном масштабе изображает величину скорости v.

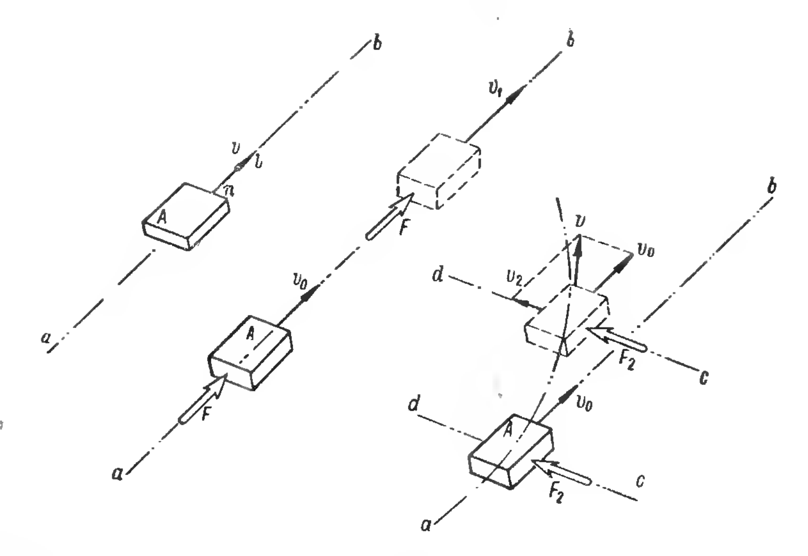


Рис. 12. Различные виды движения тела.

И. Ньютон установил также, что *ускорение w тела, характеризующее изменение скорости его движения, пропорционально действующей на тело силе F и обратно пропорционально массе m этого тела, равной весу G тела, деленному на ускорение свободного падения g.* Этот вывод, имеющий всеобщий характер, носит название **второго закона Ньютона** и может быть выражен формулой

$$w = \frac{F}{m} = \frac{F}{\frac{G}{g}},$$

из которой следует, что сила F, необходимая для сообщения телу ускорения w, равна массе m тела, умноженной на его ускорение:

$$F = mw. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что для изменения скорости и направления движения тела необходимое внешнее усилие должно быть тем больше, чем больше масса тела и чем большее ускорение ему сообщается. Таким образом, именно масса тела обладает *инертностью*, или, иначе говоря, свойством сохранять свое состояние движения неизменным независимо от того, находится ли она в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения. В описанном проявлении инертности массы и заключается сущность основного закона, которому движение гироскопа подчинено в такой же мере, как и движение любого другого тела.

Если на тело A, движущееся по прямой ab со скоростью v_0 (рис. 12), подействовать в направлении его движения силой F, то по истечении весьма малого промежутка времени Δt оно будет продолжать двигаться в прежнем направлении ab, но уже с новой скоростью v_1. Изменение скорости движения тела за время Δt и характеризует его ускорение

$$w = \frac{v_1 - v_0}{\Delta t},$$

измеряемое в сантиметрах в секунду в квадрате (*см/сек²*) при оценке скорости в сантиметрах в секунду (*см/сек*).

В общем случае под воздействием внешней силы тело может изменять одновременно и скорость и направление своего движения. Представим себе, что на тело A, движущееся в направлении ab со скоростью v_0, подействовала сила F_2, направленная по линии cd, перпендикулярной к ab. Под влиянием этого усилия тело получит ускорение в направлении cd, в результате чего по прошествии времени Δt оно кроме скорости v_0 в направлении ab приобретет некоторую дополнительную скорость v_2 в направлении cd.

Нетрудно определить новое направление и вычислить новую скорость v движения рассматриваемого тела. Как известно, направление движения будет определяться

диагональю параллелограмма, стороны которого равны векторам v_0 и v_2, а значение суммарной скорости v — длиной этой диагонали, вычисленной в соответствии с масштабом, принятым для построения векторов v_0 и v_2.

Для получения ясного представления о сущности проявления основного закона движения при опытах с гироскопическими приборами необходимо выяснить возможные перемещения гироскопа в пространстве. Нетрудно заметить, что движение гироскопа состоит из его вращения вокруг трех осей подвеса (см. рис. 9). Для оценки таких поворотов необходимо иметь суждение о величинах и направлениях скоростей вращения гироскопа вокруг каждой из этих осей в отдельности.

Скорость вращения тел измеряют обычно либо числом оборотов в минуту, либо числом радианов в секунду[1]. Скорость вращения в один радиан в секунду соответствует повороту рассматриваемого тела за одну секунду на угол φ_R (рис. 13), равный центральному углу, опирающемуся на дугу ab, длина которой равна радиусу R окружности. Если рассматриваемое тело в течение 1 *сек* совершит один оборот, повернувшись на 360°, то угловая скорость его вращения, выраженная в радианах в секунду, будет равна

$$\Omega = \frac{2\pi R}{R} = 2\pi \ \text{сек}^{-1} .$$

Если же тело в течение 1 *мин* совершает n оборотов, то величина его угловой скорости определится равенством

$$\Omega = 2\pi \frac{n}{60} \ \text{сек}^{-1} .$$

Но одна величина угловой скорости еще не дает полного представления о характере вращательного движения. Необходимо знать еще и положение в пространстве оси, вокруг которой происходит рассматриваемое вращение,

---

[1] Угол величиной в один радиан равен примерно 57°.

и направление последнего. Для записи указанных сведений удобнее всего пользоваться изображением угловых скоростей с помощью векторов. Обозначая угловую скорость Ω вектором, мы должны совместить его с осью *AA* вращения тела и направить в такую сторону, чтобы со стороны конца вектора вращение тела представлялось происходящим против часовой стрелки. Что касается величины угловой скорости Ω, то она характеризуется длиной вектора, которая определяет в выбранном масштабе численное значение скорости Ω.

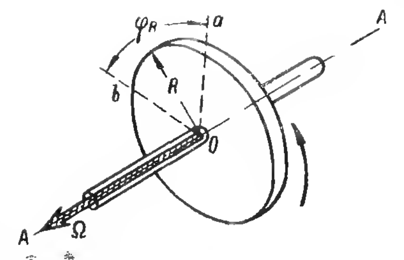


Рис. 13. Схема вращения тела вокруг оси.

Важно обратить внимание на тот факт, что ускорение, вызванное воздействием на тело внешних сил, оценивает изменение скорости его движения не только по величине, но и по направлению. Для пояснения сказанного рассмотрим материальную частицу в виде шарика *D* (рис. 14), соединенного нерастяжимой нитью *OD* длиной *R* с валом *B* электродвигателя *ЭД*, корпус которого неподвижно закреплен на фундаменте.

Как только вал двигателя начнет вращаться вокруг оси *AA*, сразу же во вращение вокруг нее будет приведен и шарик *D*. При вращении вала, а следовательно, и шарика с постоянной угловой скоростью Ω его окружная скорость $v = \Omega R$ будет оставаться постоянной. Однако движение шарика *D* не является равномерным и прямолинейным, так как его направление непрерывно изменяется.

Действительно, если бы шарик *D* двигался равномерно и прямолинейно, то, начиная, например, с точки *a*, его перемещение происходило бы по прямой *ab*. Но шарик движется по дуге окружности радиусом *R*. Поэтому в точке *C* направление скорости v_C его движения будет

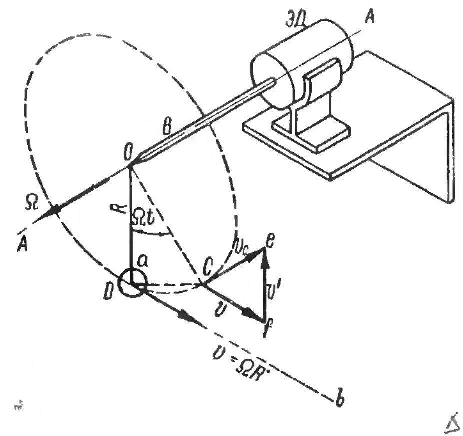


Рис. 14. К определению центростремительного ускорения.

уже отличным от направления скорости v, хотя численные их значения останутся равными.

Поскольку v и v_C являются скоростями одного и того же непрерывно движущегося тела D, то очевидно, что скорость v_C образовалась из начальной скорости v, получившей из-за тех или иных причин изменение на величину $\Delta v'$. Скорости v и $\Delta v'$ дают в геометрической сумме ту результирующую скорость v_C, которой тело D будет обладать в точке C.

Учитывая, что благодаря равенству скоростей v и v_C треугольник Cfe является равнобедренным и подобным треугольнику OaC, у которого стороны Oa и OC равны между собой и одновременно равны радиусу R, можно составить отношение между сторонами этих двух треугольников:

$$\frac{fe}{Cf} = \frac{aC}{Oa}.$$

Отрезки Cf и fe в выбранном масштабе выражают численные значения скоростей v и v'. Величина Oa равна радиусу R окружности, по которой происходит перемещение тела D. Кроме того, при малом значении угла Ωt поворота тела D вокруг оси AA длина дуги $aC = R\Omega t$ будет практически равна длине хорды aC. Учитывая сказанное, перепишем последнее отношение в следующем виде:

$$\frac{v'}{v} = \frac{R\Omega t}{R},$$

откуда находим

$$v' = v\Omega t.$$

Таково значение той дополнительной скорости, которая была сообщена движущемуся шарику при повороте двигателя на угол Ωt.

Эта дополнительная скорость v' и повлекла за собой изменение первоначальной скорости v. Относя величину v' изменения скорости движения ко времени t, в течение которого это изменение произошло, мы найдем величину ускорения тела.

Если угол поворота Ωt уменьшить до очень малого значения, близкого к нулю, рассматривая поворот тела за весьма малый промежуток времени Δt, то нетрудно убедиться в том, что дополнительная скорость v' направлена вдоль радиуса R. Иными словами, рассматриваемое ускорение направлено к центру вращения, отчего оно и получило название центростремительного. Его величина определяется равенством

$$w_{ц} = \frac{v'}{\Delta t} = \frac{v\Omega\Delta t}{\Delta t} = v\Omega.$$

Выше уже говорилось о том, что для сообщения телу ускорения на него необходимо воздействовать внешним усилием. В рассматриваемом случае (рис. 14) это усилие совпадает по направлению с радиусом R и действует на тело D со стороны нерастяжимой нити OD. В свою очередь тело D будет действовать на нить силой, равной по величине внешнему усилию, но обратной ему по направлению. Такие силы, развиваемые массой движущегося тела и оказывающие сопротивление внешним усилиям, называются силами инерции. Если прекратить связь между валом двигателя и телом, то с этого мгновения последнее перестанет двигаться по окружности и начнет перемещаться прямолинейно с постоянной скоростью.

Сказанное легко проверить на опыте. Используйте в качестве связи между валом *B* электрического двигателя *ЭД* и шариком *D* обычную суровую нитку. Приведите во вращение вал двигателя, а вместе с ним и шарик и дайте им набрать достаточно большую скорость. Приготовьте острую бритву и в тот момент, когда центр шарика D будет подходить к совмещению с точкой *a*, быстро перережьте нить. Шарик сразу же прекратит движение по окружности и начнет перемещаться вдоль прямой *ab*, с которой в момент перерезывания нити был совмещен вектор *v* его скорости.

9

Поворотное ускорение

Рассмотрим еще один, весьма важный для понимания физической сущности гироскопических явлений, случай движения тела. Представим себе, что корпус электрического двигателя *ЭД*, с валом *B* которого нитью *OD* соединен шарик *D*, может поворачиваться вокруг вертикальной оси.

Сообщим валу *B* вращение вокруг оси *AA* (рис. 15) при неподвижном пока положении корпуса двигателя *ЭД*. Вместе с валом начнет вращаться вокруг оси *AA* и шарик *D*, который будет перемещаться строго по окружности *abc*, лежащей в плоскости *Q*, перпендикулярной к оси *AA*. В то мгновение, когда шарик *D* совместится с точкой *a* на окружности *abc*, приведем корпус электрического двигателя *ЭД* во вращение вокруг оси *CC* и проследим за дальнейшим перемещением шарика *D* в течение малого промежутка времени Δt. Если бы вал *B* не вращался вокруг оси *CC*, то по прошествии времени Δt центр шарика *D*, совершив вокруг оси *AA* поворот на угол $\Omega\Delta t$, совместился бы с точкой *b* на той же окружности *abc*.

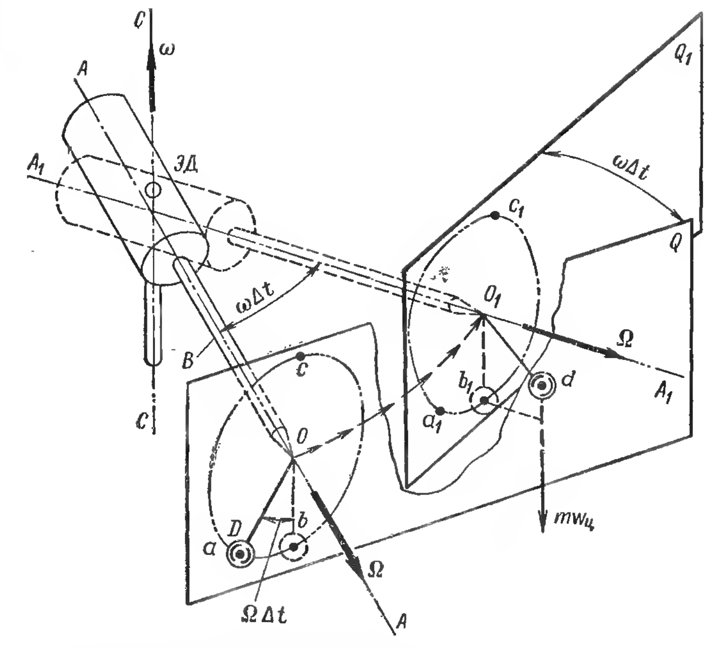


Рис. 15. Последовательные положения тела при его одновременном вращении вокруг двух осей.

В действительности же корпус двигателя *ЭД* не остается неподвижным. В результате его вращения вокруг оси *CC* с угловой скоростью ω по прошествии времени Δt продольная ось вала *B* займет положение A_1A_1, совершив поворот на угол $\omega\Delta t$.

Казалось бы, при таком сложном движении центр шарика *D* по прошествии времени Δt должен был бы совместиться с точкой b_1 на окружности $a_1b_1c_1$, лежащей в плоскости Q_1, повернутой вокруг оси *CC* на угол $\omega\Delta t$ относительно плоскости *Q*. Однако такого совмещения мы

наблюдать не будем. В самом деле, если предположить, что шарик D совместился с точкой b_1, то это свидетельствовало бы о его отклонении из плоскости Q первоначального движения. Но для этого, как мы уже видели выше (см. рис. 12), было бы необходимо воздействовать на шарик D в течение всего промежутка времени Δt внешним усилием, направленным вдоль продольной оси вала B.

Осуществить указанное воздействие с помощью единственной связи — нити OD — не представляется возможным. Удерживая шарик D в радиальном направлении, нить OD не может ограничить его перемещений вдоль оси вала B. Вот почему при одновременном вращении шарика вокруг осей AA и CC его масса, стремясь в силу своей инертности сохранить направление движения совмещенным с плоскостью Q, будет постепенно отклоняться от плоскости Q_1, перпендикулярной к продольной оси вала B, в каждое данное мгновение. Именно поэтому в тот момент, когда шарик D должен был бы совместиться с точкой b_1, находящейся в плоскости Q_1, он в действительности будет находиться в точке d, лежащей в плоскости Q.



Рис. 16. Матерчатый ротор.

Описанное сложное движение тела при одновременном вращении вокруг двух осей можно продемонстрировать с помощью установки, состоящей из электрического двигателя (рис. 16), на горизонтально расположенном валу которого закреплен матерчатый ротор. Корпус электродвигателя смонтирован на основании, способном вращаться вокруг вертикальной оси аналогично тому, как это было показано на рис. 15. До тех пор пока двигатель не приведен во вращение, матер-

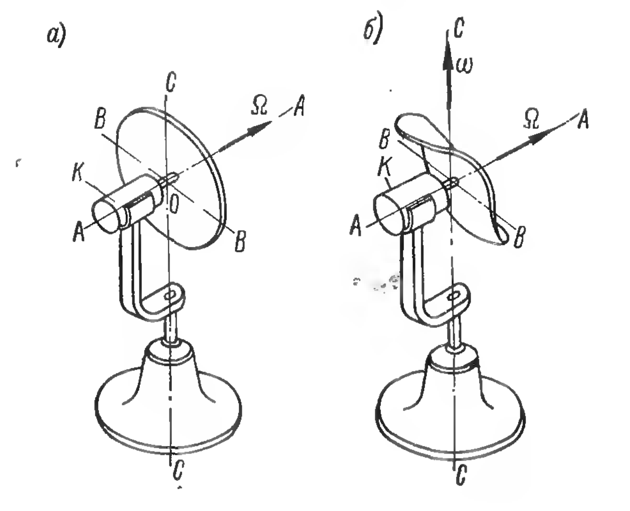


Рис. 17. Установка для демонстрации сложного движения матерчатого ротора.

чатый ротор под влиянием силы собственного веса будет занимать самое произвольное положение, как это видно на рисунке.

Оставляя корпус *K* электродвигателя неподвижным (рис. 17), сообщим валу двигателя, а тем самым и матерчатому ротору вращение с достаточно большой угловой скоростью Ω вокруг оси *AA*. В этом случае, приобретая благодаря действию центробежных сил инерции значительную жесткость, ротор будет вращаться строго в одной плоскости, перпендикулярной к оси *AA* (рис. 17, *а*).

Если же корпусу *K* двигателя сообщить вращение вокруг оси *CC*, то ротор сразу же изогнется относительно оси *BB*, как это показано на рис. 17, *б*, подтверждая тем самым на опыте стремление каждой из материальных частиц, составляющих его тело, сохранить первоначальное



Рис. 18. Изгиб матерчатого ротора.

направление своего движения. Характерная форма изогнутого гибкого ротора хорошо видна на рис. 18.

Изгиб матерчатого ротора относительно оси BB (рис. 17), так же как и отклонение шарика D от плоскости Q_1 (см. рис. 15), не будет безграничным. Как мы уже видели выше, при вращении тела вокруг оси AA на нить OD действует центробежная сила инерции $mw_ц$, направленная от центра вращения O по радиусу R и равная произведению массы m тела на его центростремительное ускорение. Поэтому как только шарик D выйдет из плоскости Q_1, так сразу же центробежная сила $mw_ц$ создаст относительно точки O_1 момент, стремящийся вернуть шарик D в плоскость Q_1. Этот момент, возрастающий с увеличением отклонения шарика D от плоскости Q_1, будет ограничивать свободу его перемещения вдоль оси вала B и в конечном итоге заставит шарик поворачиваться вместе с плоскостью Q_1 вокруг оси CC. Иными словами, заставит его двигаться с ускорением, направленным вдоль оси вращения вала B. Указанное ускорение получило название поворотного, или кориолисового,* ускорения, которое условимся обозначать через $w_п$.

Какова же величина поворотного ускорения и от каких параметров она зависит? Для выяснения этого вопроса рассмотрим одновременное вращение тела D вокруг оси OA с угловой скоростью Ω и вокруг оси CC с угловой скоростью ω (рис. 19). Проследим за перемещением тела, начиная с того момента, когда оно совместилось с точкой a

* По имени французского ученого Г. Кориолиса (1792—1843 гг.).

на окружности abe, затемненной на схеме. В это мгновение тело D, удаленное на расстояние R от оси вращения OA, обладало окружной скоростью $v = \Omega R$, вектор которой был направлен по касательной к окружности abe в точке a и совмещен с плоскостью Oab. Так как тело D совершает сложное движение, то по прошествии времени Δt оно переместится не только по дуге окружности радиусом R на величину угла $\Omega \Delta t$,

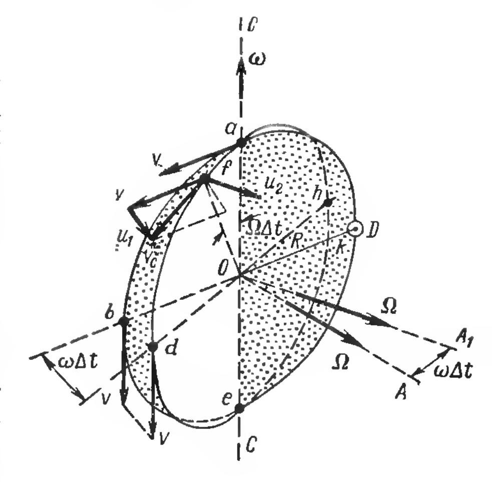


Рис. 19. К определению поворотного ускорения.

но и совершит поворот вокруг оси CC на угол $\omega \Delta t$. В результате в момент времени Δt тело займет положение, отмеченное на схеме точкой f, в которой оно будет обладать скоростью $v_C = v$, но теперь направленной уже в плоскости Oad, составляющей с плоскостью Oab угол $\omega \Delta t$.

Скорость v_C образовалась из первоначальной скорости v, получившей некоторое приращение. Для определения его величины перенесем вектор скорости v параллельно самому себе в точку f и построим параллелограмм скоростей, диагональю которого окажется вектор результирующей скорости v_C. Из параллелограмма скоростей следует, что величина u_1 и является той скоростью, которая дополнительно была сообщена телу D за промежуток времени Δt.

При бесконечно малом времени Δt угол $\omega \Delta t$ будет также весьма малым, в связи с чем величину дополнитель-

ной скорости u_1 мы можем полагать геометрически равной длине дуги окружности, проведенной из точки f как из центра, радиусом, равным длине вектора скорости v:

$$u_1 = v\omega\Delta t.$$

Необходимо заметить, что, перемещаясь по дуге af, тело будет непрерывно удаляться от оси CC. В момент времени Δt при малой величине угла поворота $\Omega\Delta t$ расстояние тела D от оси CC можно определить как путь, пройденный телом, движущимся со скоростью v, за промежуток времени Δt:

$$af = v\Delta t.$$

Следовательно, находясь в точке f, тело D, вращаясь вокруг оси CC с угловой скоростью ω, кроме скорости v_C будет обладать еще и скоростью

$$u_2 = af\omega = v\omega\Delta t.$$

Суммарное значение скоростей u_1 и u_2 является той общей дополнительной скоростью, которая за промежуток времени Δt была сообщена телу в процессе его одновременного поворота вокруг осей OA и CC. Относя указанное суммарное приращение скорости тела ко времени Δt, мы и определим величину поворотного ускорения:

$$w_п = \frac{u_1 + u_2}{\Delta t} = \frac{v\omega\Delta t + v\omega\Delta t}{\Delta t} = 2v\omega. \qquad (2)$$

Из схемы (рис. 19) видно, что чем меньше промежуток времени Δt, тем меньше угол $\omega\Delta t$ между последовательными положениями осей OA и OA_1. В пределе, когда угол $\omega\Delta t$ близок к нулю, направления векторов обеих дополнительных скоростей u_1 и u_2 будут совпадать между собой и станут параллельными оси OA. Следовательно, и поворотное ускорение $w_п$ тела D, находящегося в точке a, будет направлено вдоль оси OA.

С таким же по величине поворотным ускорением, но имеющим противоположное направление, будет двигаться

тело в момент совмещения с точкой e. Но зато при совмещении тела с точкой d поворотное ускорение становится равным нулю. В самом деле, при постоянстве угловой скорости Ω и в точке b, и в близкой к ней точке d окружная скорость v тела сохраняет постоянство и величины, и направления. Таким образом, в этих положениях наличие угловой скорости ω не вызывает изменения скорости v ни по величине, ни по направлению. Следовательно, поворотное ускорение тела в этом случае действительно отсутствует.

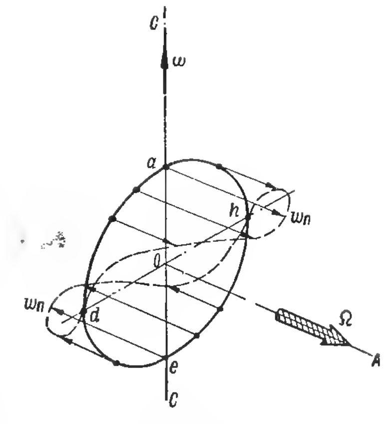


Рис. 20. Диаграмма изменения поворотного ускорения.

Приведенные рассуждения относятся полностью и к точкам k и h, в которых поворотное ускорение тела D становится также равным нулю. В обеих указанных точках вектор скорости v также направлен вдоль оси CC, но теперь вертикально вверх. Поэтому величина и направление скорости v в точках k и h останутся неизменными, несмотря на вращение тела вокруг оси CC с угловой скоростью ω.

Определяя аналогичным образом величину и направление поворотного ускорения тела в каждой точке окружности, по которой оно перемещается в процессе своего вращения вокруг оси OA, и откладывая его на чертеже (рис. 20) в выбранном масштабе, получим своеобразную диаграмму изменения поворотного ускорения в зависимости от угла $\Omega\Delta t$ поворота тела вокруг оси OA. Из полученной диаграммы следует, что величина поворотного ускорения $w_п$ достигает максимального значения в точках a и e и становится равной нулю в точках d и h, в которых происходит изменение направления вектора $w_п$.

10

Момент гироскопической реакции

Для того чтобы тело двигалось с поворотным ускорением $w_п$, необходимо, так же как и при сообщении телу любого другого ускорения (см. рис. 12), воздействовать на него внешним усилием. Сделанное утверждение можно легко проверить на опыте с помощью поворотного стенда (рис. 21), на котором установлены два шкива, соединенных между собой круглым резиновым ремнем. Ремень туго надевается на шкивы. Поэтому, чтобы отклонить его от вертикальной плоскости шкивов, требуется значительное усилие, направленное вдоль их осей вращения. Усилие это может быть измерено специальным пружинным динамометром, установленным на поворотном столе между шкивами.

Оставляя стол неподвижным, приведем шкивы во вращение, включив для этого электрический двигатель, смонтированный на поворотном столе. В результате ремень начнет перемещаться вдоль стола с некоторой скоростью v (рис. 22, *а*). Опыт показывает, что перемещение ремня в этом случае будет происходить строго в вертикальной плоскости шкивов. Однако достаточно сообщить столу вращение вокруг вертикальной оси со скоростью ω (рис. 22, *б*), чтобы картина резко изменилась. Ветви ремня изогнутся в горизонтальной плоскости и притом во взаимно противоположных направлениях. Указанный изгиб объясняется тем, что при перемещении ремня вдоль

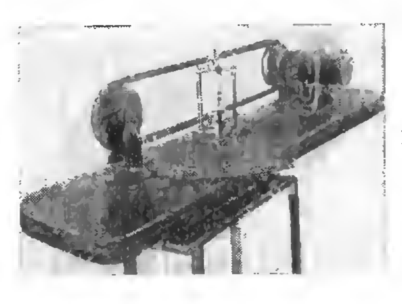


Рис. 21. Поворотный стенд для демонстрации сил инерции, возникающих при поворотном ускорении.

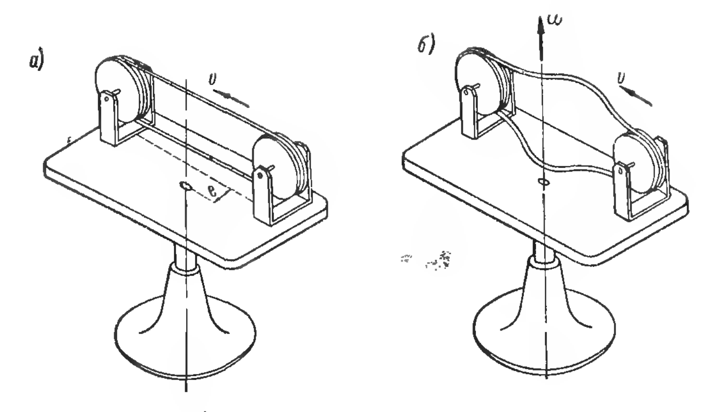


Рис. 22. Изгиб ремня при поворотном ускорении.

стола со скоростью v и одновременном вращении совместно со столом вокруг вертикальной оси с угловой скоростью ω материальные частицы, составляющие тело ремня, будут перемещаться с поворотным ускорением. В силу присущей их массам инерции, стремясь сохранить свое прежнее направление движения, они начнут отклоняться от вертикальной плоскости вращения шкивов, вытягивая ремень в горизонтальной плоскости.

Но при растяжении ремня будут возникать упругие силы, стремящиеся вернуть его отклонившиеся материальные частицы к совмещению с плоскостью вращения шкивов. Именно эти силы упругости резинового ремня и будут преодолевать силы инерции его массы в рассматриваемом случае движения.

Для большей убедительности опыта вертикальная ось вращения стола (рис. 22, *а*) не совмещена с плоскостью вращения шкивов и отстоит от нее на расстояние e, позволяя тем самым подтвердить тот факт, что прогиб ветвей ремня вызывается отнюдь не действием центробежных сил. В самом деле, если бы причиной прогиба ремня в гори-

зонтальной плоскости являлись центробежные силы инерции, возникающие при вращении стола вокруг вертикальной оси, то обе ветви ремня получили бы изгиб в одном и том же направлении, так как они смещены относительно вертикальной оси в одном направлении и на одну и ту же величину *e*.

Таким образом, очевидно, что изгиб ветвей ремня произошел вследствие инерции массы его материальных частиц, сопротивляющихся движению с поворотным ускорением. Для подтверждения сказанного достаточно изменить направление вращения стола или шкивов. При этом сразу же изменится направление поворотного ускорения отдельных частиц ремня и направление изгиба его ветвей. Если первоначально верхняя ветвь ремня изгибалась в горизонтальной плоскости влево, а нижняя — вправо (рис. 22, *б*), то теперь направления их изгибов изменятся на обратные.

Описанные опыты убедительно показывают, что при сообщении телу поворотного ускорения возникает сопротивление сил инерции его массы, что имеет существенное значение при работе различных механизмов, машин и приборов. При больших вращающихся массах величина указанного сопротивления может достигать таких больших значений, которые приводят даже к разрушению отдельных деталей. Для предупреждения подобных аварийных случаев необходимо предварительно определять величины нагрузок, зависящих от поворотного ускорения, возникающего при вращении отдельных деталей механизмов вокруг двух осей одновременно.

Нам уже известно, что при одновременном вращении тела вокруг двух осей *AA* и *CC* соответственно с угловыми скоростями Ω и ω оно перемещается с поворотным ускорением $w_п$, направленным вдоль оси *AA* (рис. 23). Для осуществления движения тела с таким ускорением необходимо преодолеть силу инерции $mw_п$, направленную противоположно ускорению $w_п$.

Нетрудно заметить, что сила инерции $mw_п$ будет создавать момент $M_г$ относительно оси BB. Этот момент, равный по величине произведению силы инерции $mw_п$ на длину l перпендикуляра, опущенного из точки O на направление линии действия силы $mw_п$, носит название **момента гироскопической реакции**.

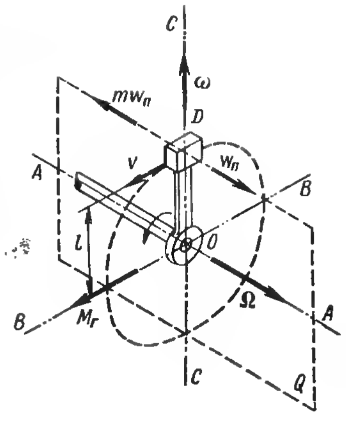


Рис. 23. К объяснению момента гироскопической реакции.

Момент $M_г$, создаваемый силой инерции $mw_п$, так же как и момент любой другой силы, удобно представить вектором. В данном случае вектор момента гироскопической реакции $M_г$ будет совмещен с осью BB, проходящей через точку O перпендикулярно к плоскости Q, с которой совмещены и вектор силы инерции $mw_п$, и точка O. Вектор момента $M_г$ должен быть направлен по оси BB в такую сторону, чтобы со стороны конца его момент, создаваемый силой $mw_п$, представлялся действующим против часовой стрелки.

Учитывая, что в технике, как правило, приходится встречаться с вращающимися телами цилиндрической формы, вычислим величину момента гироскопической реакции массы диска при его вращении одновременно вокруг двух осей. Представим себе ротор, смонтированный на подшипниках L и N в корпусе K. Если такому ротору (рис. 24) сообщить вращение вокруг оси AA с угловой скоростью Ω, а его корпусу K — вращение вокруг оси CC с угловой скоростью ω, то материальные частицы, составляющие тело ротора, получат движение с поворотным ускорением, величина которого для каждой отдельной частицы будет различна. Действительно, окружную

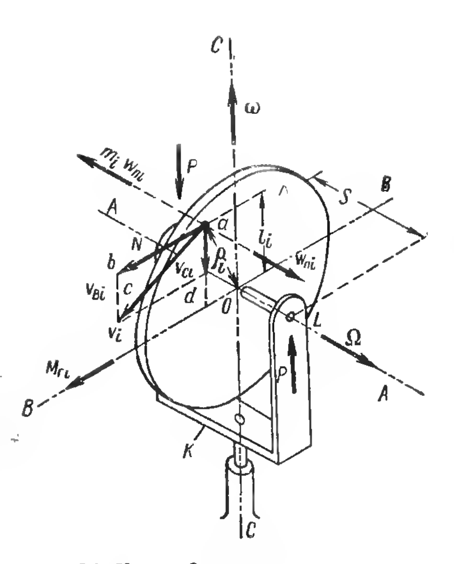


Рис. 24. К определению момента гироскопической реакции.

скорость v_i любой точки a ротора можно разложить на две составляющие: v_{Ci} — вдоль оси CC и v_{Bi} — вдоль оси BB. Именно наличие у материальной частицы скорости v_{Bi} и вызывает движение данной частицы с поворотным ускорением. Чем больше скорость v_{Bi}, тем больше величина поворотного ускорения.

Положение любой произвольно выбранной точки a в теле ротора определяется ее расстояниями ρ_i от оси AA и l_i от оси BB. Учитывая подобие треугольников abc и adO, обусловленное взаимной перпендикулярностью сторон одного из рассматриваемых треугольников соответствующим сторонам другого треугольника, считаем, что в этом случае три стороны одного треугольника пропорциональны трем сторонам второго. На указанном основании можем составить соотношение $\frac{ab}{ac} = \frac{ad}{aO}$, или, подставляя значения указанных геометрических отрезков, $\frac{v_{B_i}}{v_i} = \frac{l_i}{\rho_i}$, находим, что $v_{B_i} = v_i \frac{l_i}{\rho_i}$.

Но при вращении ротора вокруг оси AA с угловой скоростью Ω окружная скорость v_i любой его точки будет равна произведению $\Omega\rho_i$ и, следовательно,

$$v_{B_i} = \Omega\rho_i \frac{l_i}{\rho_i} = \Omega l_i.$$

Зная скорость v_{Bi} выбранной точки, можно определить, пользуясь формулой (2), величину ее поворотного ускорения

$$w_{\text{п}_i} = 2v_{B_i}\omega = 2\Omega\omega l_i.$$

Масса m_i материальной частицы, расположенной вблизи выбранной точки ротора, будет создавать при его сложном движении сопротивление, определяемое величиной силы инерции

$$m_i w_{\text{п}i} = 2m_i\Omega\omega l_i.$$

Указанная сила инерции направлена противоположно поворотному ускорению $w_{\text{п}i}$, поэтому, действуя относительно оси BB на плече l_i, она будет создавать момент гироскопической реакции

$$M_{\text{г}i} = m_i w_{\text{п}i} l_i = 2m_i\Omega\omega l_i^2 .$$

Если общее количество материальных частиц, составляющих тело ротора, равно n, то суммарный момент гироскопической реакции будет равен

$$M_{\text{г}} = 2\Omega\omega\left(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 + \ldots + m_n l_n^2\right).$$

Величина $2\left(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 + \ldots + m_n l_n^2\right)$ носит название момента инерции ротора относительно оси AA его собственного вращения и измеряется в $\Gamma \cdot \text{см} \cdot \text{сек}^2$. Обозначим ее буквой J и перепишем последнее равенство в следующем виде:

$$M_{\text{г}} = J\Omega\omega. \qquad (3)$$

Полученная формула (3) позволяет вычислять значение момента гироскопической реакции для любой детали, имеющей форму диска и вращающейся одновременно вокруг двух осей. Момент гироскопической реакции $M_г$ массы ротора, возникающий при его одновременном вращении вокруг осей AA и CC (рис. 24), будет создавать на подшипники L и N дополнительную нагрузку P. Ее величина зависит от расстояния S между подшипниками и определяется равенством

$$P = \frac{M_г}{S} = \frac{J\Omega\omega}{S}. \tag{4}$$

При практическом использовании гироскопического эффекта существенное значение имеет не только величина, но и направление действия момента гироскопической реакции. Нетрудно заметить (рис. 24), что момент гироскопической реакции, который для краткости условимся называть просто **гироскопическим моментом**, как бы стремится повернуть ротор вокруг оси BB таким образом, чтобы его ось AA кратчайшим путем пришла к совмещению с осью CC вынужденного поворота.

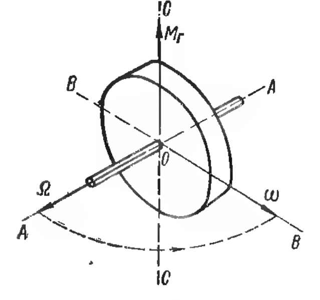


Рис. 25. Схема для определения направления действия гироскопического момента.

Рассмотренное действие гироскопического момента будет иметь место при вынужденном повороте быстро вращающегося ротора вокруг любой оси, не совпадающей с осью AA. Для определения направления его действия можно сформулировать следующее правило: *при сообщении ротору, вращающемуся со скоростью Ω вокруг оси AA, одновременного вращения со скоростью ω вокруг какой-либо другой оси, перпендикулярной к*

первой, возникнет гироскопический момент $M_г$ (рис. 25), *вектор которого перпендикулярен к векторам обеих угловых скоростей* Ω *и* ω *и направлен в ту сторону, откуда совмещение вектора* Ω *по кратчайшему расстоянию с вектором* ω *будет казаться происходящим против часовой стрелки.*

11

Нутация и прецессия гироскопа. Основной закон прецессии

Рассмотрим теперь случай движения гироскопа под действием внешних сил. Для лучшего уяснения природы этого движения разберем предварительно несколько простых примеров. Закрепим установленный на корпусе K стопорный винт d (рис. 26) и, лишив тем самым гироскоп свободы вращения вокруг оси CC, сообщим его ротору вращение вокруг оси AA со скоростью Ω. Как только эта скорость достигнет достаточной величины, приведем корпус K в движение вокруг оси CC со скоростью ω_K. Так как ротор не может вращаться вокруг этой оси самостоятельно, то он будет вынужден перемещаться вокруг оси CC совместно с корпусом K.

Если бы гироскоп был лишен свободы вращения вокруг оси BB, то данный случай явился бы повторением рассмотренного выше (см. рис. 24). Но в отличие от него в нашем опыте ротор может свободно поворачиваться вокруг оси BB. Поэтому материальные точки его тела, стремясь в силу инертности их массы сохранять неизменным направление своего движения, начнут отклоняться от плоскости COB (рис. 26).

Поворот ротора вокруг оси BB будет происходить до тех пор, пока главная ось AA гироскопа не совместится с осью CC его вынужденного поворота, когда произойдет

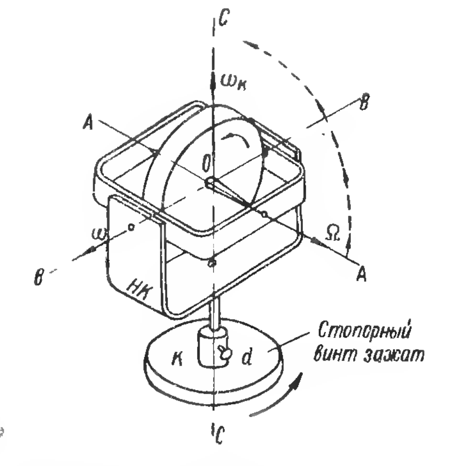


Рис. 26. Схема движения гироскопа при вынужденном повороте.

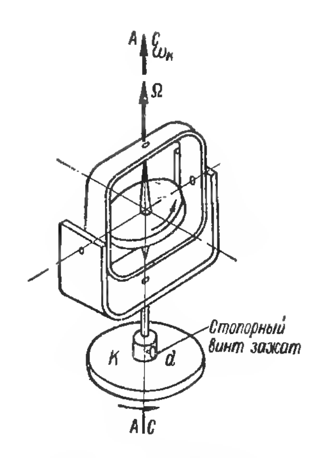


Рис. 27. Совмещение главной оси гироскопа с осью его вынужденного поворота.

совмещение и векторов угловых скоростей Ω и ω_K (рис. 27). Поворот ротора вокруг оси *BB* в данном случае, так же как и в разобранном выше (рис. 24), будет происходить в направлении, при котором совмещение вектора собственной угловой скорости Ω с вектором угловой скорости ω_K вынужденного вращения совершается по кратчайшему расстоянию. Поэтому, представляя угловую скорость поворота ротора вокруг оси *BB* вектором ω, мы должны направить его перпендикулярно к векторам Ω и ω_K в сторону, откуда совмещение этих векторов будет казаться происходящим против часовой стрелки, как это и показано на рис. 26.

Поворот ротора вокруг оси *BB* может быть в рассматриваемом случае ликвидирован грузом *P* (рис. 28), величину которого необходимо подобрать так, чтобы созда-

ваемый им на плече l момент Pl был равен по величине, но противоположен по направлению гироскопическому моменту $J\Omega\omega_K$. При этом условии инерция массы ротора будет преодолена и последний будет вынужден совершать одновременное вращение вокруг двух осей AA и CC, сопровождающееся поворотным ускорением. Так как ротор гироскопа теперь не поворачивается вокруг оси BB, то его главная ось AA в течение всего опыта будет оставаться перпендикулярной к плоскости COB.

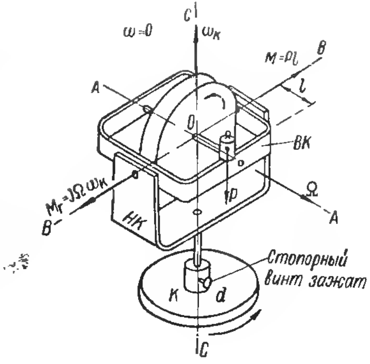


Рис. 28. Случай равенства гироскопического и внешнего моментов.

Как видим, для преодоления сил инерции массы ротора, возникающих при сообщении ему одновременного вращения вокруг осей AA и CC, на гироскоп потребовалось воздействовать внешней силой P, создающей относительно оси BB момент

$$Pl = J\Omega\omega_K. \tag{5}$$

Только при этом условии вращение ротора вокруг оси AA со скоростью Ω и одновременно совместно с корпусом K вокруг оси CC со скоростью ω_K не будет вызывать поворота гироскопа вокруг оси BB.

Освободим теперь стопор d, обеспечив тем самым гироскопу свободу вращения вокруг оси CC по отношению к корпусу K прибора. Очевидно, что с этого мгновения гироскоп уже не будет участвовать во вращении корпуса, какую бы угловую скорость последнему теперь ни сообщали. Поэтому прекратим поворот корпуса вокруг оси CC и рассмотрим движение гироскопа, обладающего свободой вращения вокруг всех трех осей AA, BB и CC, под воздействием момента $M = Pl$.

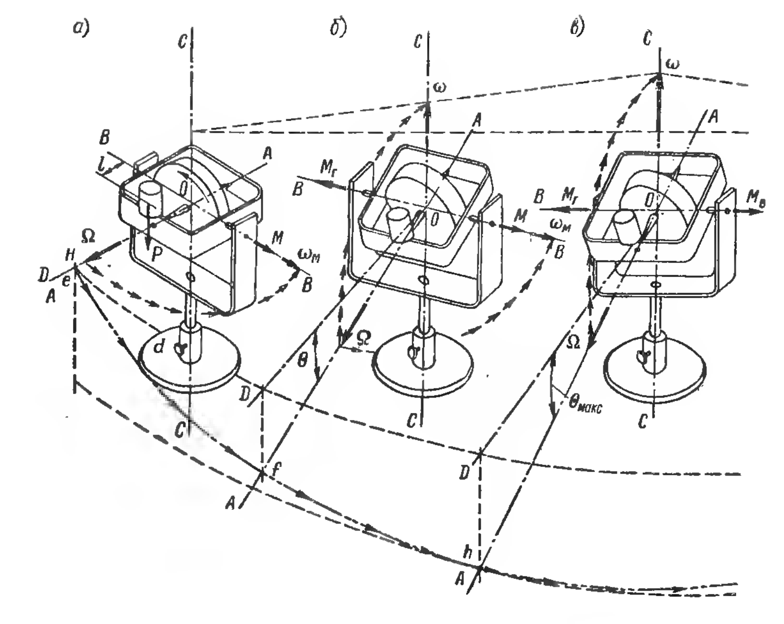
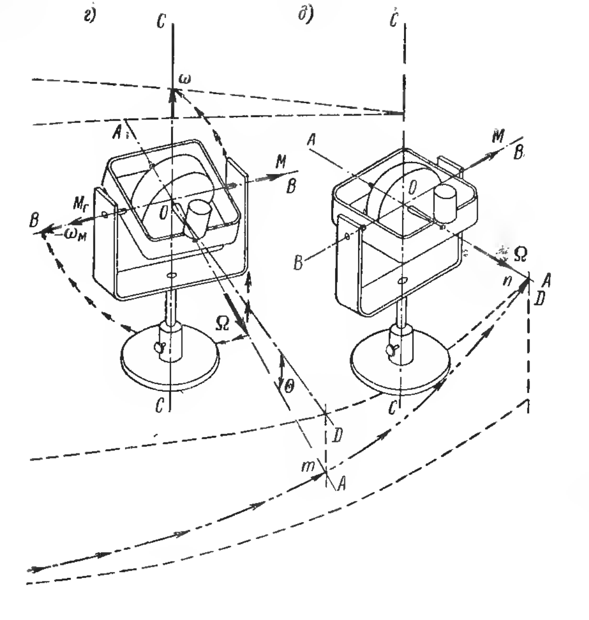


Рис. 29. К объяснению нутации и прецессии гироскопа.

Предположим, что в начальный момент времени, соответствующий освобождению стопора d (рис. 29, a), главная ось AA гироскопа была совмещена с осью OD, перпендикулярной к осям BB и CC его подвеса. В этот же момент точка H, произвольно выбранная на оси AA и называемая полюсом гироскопа, была совмещена с точкой e в пространстве. После освобождения стопора d гироскоп под влиянием момента $M = Pl$ получит, как и любое другое тело, ускоренное движение в направлении действия момента и начнет поворачиваться вокруг оси BB со все возрастающей угловой скоростью ω_M (рис. 30).



Таким образом, с первого же мгновения гироскоп, вращающийся вокруг осей AA и BB со скоростями Ω и ω_M, будет вынужден двигаться, согласно изложенному в § 9, с поворотным ускорением. Масса его ротора, сопротивляясь в силу своей инертности такому ускоренному движению, будет стремиться совместить по кратчайшему расстоянию вектор угловой скорости Ω собственного вращения гироскопа с вектором угловой скорости ω_M его вынужденного поворота. Однако конструкция карданова подвеса не позволит произойти совмещению осей AA и BB, в связи с чем гироскоп начнет поворачиваться вокруг оси CC с угловой скоростью ω (рис. 29, *б*). Описанный поворот

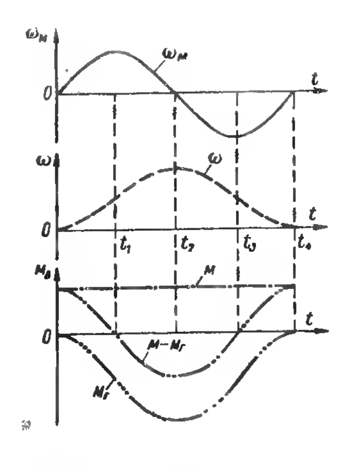


Рис. 30. Графики изменения угловых скоростей нутации гироскопа.

гироскопа вокруг осей BB и CC вызовет непрерывное отклонение его полюса H от точки e, которое будет происходить одновременно и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях.

Чем бóльшую скорость ω_M приобретает гироскоп под влиянием момента M, тем большее поворотное ускорение, согласно формуле (2), ему будет сообщаться и тем с большей угловой скоростью ω он будет поворачиваться вокруг оси CC. Но при одновременном вращении гироскопа со скоростями Ω и ω вокруг осей AA и CC сопротивление массы его ротора вызовет гироскопический момент $M_г = J\Omega\omega$ (рис. 30), действующий относительно оси BB и стремящийся совместить вектор скорости Ω с вектором скорости ω (рис. 29, *б*).

С увеличением скорости ω гироскопический момент $M_г$ (рис. 30) будет расти и тем самым уменьшать значение суммарного момента $M - M_г = M_B$, действующего относительно оси BB. В результате ускорение гироскопа вокруг оси BB, порождаемое моментом M внешних сил, начнет снижаться, обусловливая тем самым падение интенсивности нарастания скорости ω_M. Однако величина ω_M хотя и медленнее, но все еще будет увеличиваться, благодаря чему угловая скорость ω поворота гироскопа вокруг оси CC будет также продолжать расти.

К некоторому моменту времени $t = t_1$ (рис. 30), когда ось AA составит с плоскостью DOB угол θ и полюс H совместится в пространстве с точкой f (рис. 29, *б*), угловая скорость ω достигнет такого значения, при котором насту-

пит равенство гироскопического M_1 и внешнего M моментов. Их суммарное значение станет равным нулю:

$$M - M_г = Pl - J\Omega\omega = 0, \qquad (6)$$

и увеличение скорости ω прекратится.

С этого мгновения дальнейший поворот гироскопа вокруг оси BB будет происходить уже с постоянной угловой скоростью ω_M. С ее вектором силы инерции, порождаемые массой ротора, все еще будут стремиться совместить вектор угловой скорости Ω его собственного вращения. Поэтому гироскоп будет продолжать поворачиваться вокруг оси CC со все возрастающей скоростью ω.

Естественно, что вместе с ω будет увеличиваться и гироскопический момент $M_г$, величина которого начнет теперь превышать момент M внешней силы. Последний уже не сможет погасить инерцию массы ротора, которая начнет оказывать все увеличивающееся сопротивление движению гироскопа с поворотным ускорением, вызываемым одновременным вращением его ротора вокруг осей AA и BB. Скорость ω_M начнет постепенно уменьшаться и в некоторый момент времени $t = t_2$ (рис. 30) станет равной нулю. В этот момент ось AA составит с плоскостью DOB максимальный угол $\theta_{макс}$ (рис. 29, *в*), полюс H совместится в пространстве с точкой h и скорость ω достигнет своего максимального значения.

Как только поворот гироскопа вокруг оси BB прекратится, сразу же исчезнет и сама причина, порождающая его вращение вокруг оси CC. Однако последнее не прекращается тотчас же и в течение некоторого времени продолжается по инерции. Гироскопический момент $M_г$, превышающий теперь по величине момент M внешних сил, вновь обусловит поворот гироскопа вокруг оси BB, но в направлении, противоположном первоначальному. Его ось AA начнет возвращаться к плоскости DOB со все возрастающей по величине угловой скоростью $-\omega_M$. В результате скорость ω вращения гироскопа вокруг оси CC

начнет постепенно замедляться, уменьшая тем самым и величину гироскопического момента $M_г = J\Omega\omega$.

Превышение гироскопического момента $M_г$ над моментом M внешних сил начнет убывать и при $t=t_3$ их суммарное значение вновь станет равным нулю. В это мгновение ось AA опять составит с плоскостью DOB угол θ, а полюс H гироскопа совместится в пространстве с точкой m (рис. 29, *г*). С уменьшением скорости ω будет уменьшаться по величине и угловая скорость $-\omega_M$, в связи с чем к моменту времени $t=t_4$ (рис. 30), когда ось AA вновь совместится с плоскостью DOB (рис. 29, *д*), обе указанные скорости станут равными нулю. В это мгновение на гироскоп, так же как и в положении, показанном на рис. 29, *а*, будет действовать опять только один момент M внешних сил. Он снова вызовет ускоренный поворот гироскопа вокруг оси BB, и рассмотренный цикл движения последнего вновь полностью повторится.

Как видим, при действии на гироскоп с тремя степенями свободы относительно его внутренней оси подвеса BB момента M внешней силы гироскоп начинает совершать вокруг этой оси колебания и одновременно поворачиваться вокруг второй оси подвеса CC с переменной угловой скоростью ω. В результате за один цикл такого движения полюс H гироскопа переместится в пространстве по кривой $efhmn$.

Из графиков, приведенных на рис. 30, следует, что угловая скорость ω поворота гироскопа вокруг оси CC не меняет своего направления. Поэтому указанное вращение приближенно можно рассматривать как регулярное, происходящее с постоянной угловой скоростью, равной среднему ее значению за цикл описанных колебаний гироскопа. Величина этого среднего значения определяется равенством гироскопического $M_г$ и внешнего M моментов и составляет примерно половину той максимальной скорости, которую достигает гироскоп (рис. 29, *в*) в процессе рассматриваемых колебаний. Таким образом, величина угло-

вой скорости такого регулярного, так называемого прецессионного движения гироскопа определится из условия (6) и будет равняться

$$\omega = \frac{Pl}{J\Omega} = \frac{M}{J\Omega}. \tag{7}$$

Описанные выше колебания гироскопа, сопровождающие его прецессионное движение, получившие название нутационных колебаний, происходят с весьма малой амплитудой и очень большой частотой. Поэтому они неразличимы невооруженным глазом и воспринимаются обычно как мелкая вибрация работающего гироскопа.

Полученное уравнение (7) выражает закон прецессионного движения, или, сокращенно, прецессии, гироскопа, являющийся основным при изучении вопросов прикладного использования гироскопических свойств быстро вращающихся масс. Заметим здесь, что прецессия гироскопа происходит вокруг оси, перпендикулярной к вектору момента M внешней силы. Поэтому если бы момент M подействовал на гироскоп относительно его наружной оси подвеса CC (см. рис. 29), то прецессионное движение гироскопа происходило бы вокруг внутренней оси подвеса BB.

Для общего случая можно установить следующее правило, определяющее направление угловой скорости прецессии. При воздействии на гироскоп, обладающий свободой вращения вокруг всех трех осей подвеса, момента M внешних сил возникает прецессионное движение с угловой скоростью ω, вектор которой направлен перпендикулярно к векторам угловой скорости Ω собственного вращения ротора и момента M действующих на гироскоп внешних сил (рис. 31). При

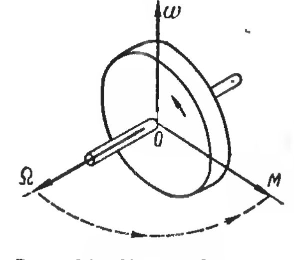


Рис. 31. К определению направления прецессии.

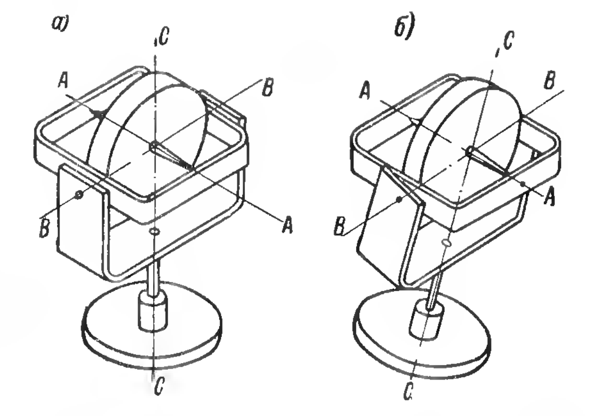


Рис. 32. Схема стабилизации главной оси гироскопа.

этом *направление вектора ω должно быть выбрано таким образом, чтобы при наблюдении с его конца за прецессионным движением оно казалось происходящим против часовой стрелки.*

Из уравнения (7) следует, что угловая скорость ω прецессии растет при увеличении момента *M*. С другой стороны, она тем меньше, чем больше при прочих равных условиях кинетический момент *J*Ω гироскопа. При отсутствии действующего на гироскоп момента внешних сил угловая скорость прецессии равна нулю и его главная ось *AA* (рис. 32, *а*) остается неподвижной. В этом случае корпусу гироскопа можно придавать произвольные углы наклона (рис. 32, *б*) и сообщать любые угловые скорости вращения. При всех этих поворотах главная ось *AA* гироскопа будет сохранять неизменным, или, как говорят, стабильным первоначально ей заданное направление в пространстве. Указанное свойство гироскопа широко используется в технике при необходимости сохранения стабильным на качающейся платформе нужного направления.

* * *

Еще в начале текущего столетия английский ученый Дж. Перри писал [5], что «если бы глубокому исследованию поведения волчка было уделено больше внимания, то наши достижения в области технической механики и многих отраслей промышленности были бы более значительны». С тех пор прошло много времени, и изучение законов движения гироскопа стало самостоятельной быстро развивающейся отраслью научных знаний.

Наибольший вклад в науку о гироскопе был сделан русскими учеными. Работы О. И. Сомова, Д. К. Бобылева, В. А. Стеклова, С. В. Ковалевской, Г. К. Суслова, Н. Е. Жуковского, А. С. Домогарова и др., посвященные изучению гироскопических явлений, признаны классическими во всем мире. Науке о гироскопе посвятили свои труды и зарубежные ученые: француз Богер, немцы Клейн, Зоммерфельд, Шулер, Мартинсен, Граммель, Магнус, англичане Гренхил, Грей, Роулингс и многие другие.

Одновременно с теоретическими исследованиями проводились работы по изысканию средств сообщения ротору гироскопа вращения вокруг его главной оси AA (см. рис. 9) с максимально возможной угловой скоростью Ω и сохранения ее постоянной. Кроме того, велись интенсивные поиски возможностей создания таких условий, при которых вращение гироскопа вокруг осей BB и CC его подвеса происходило бы с минимальным трением. Сложность этих двух проблем долгое время тормозила использование гироскопа для практических целей. И только после того, как в качестве привода ротора были использованы газовая турбина и электрический двигатель, а в качестве опор подвеса — шариковые подшипники, гироскопические приборы начали применяться в самых разнообразных отраслях техники.

Особенно широкое развитие гироскопическое приборостроение получило в нашей стране после Великой







профессор Б.И.Кудревич

Октябрьской социалистической революции. Советские ученые А. Н. Крылов, Б. В. Булгаков, Е. Л. Николаи, Б. И. Кудревич, А. И. Лурье, А. Ю. Ишлинский, С. С. Тихменев, Н. И. Сигачев, Г. О. Фридлендер, С. С. Ривкин, Г. А. Сломянский, М. Н. Катханов, Б. И. Назаров, Д. С. Пельпор, Н. В. Бутенин и многие их ученики и последователи своими работами создали прочную теоретическую базу для практического использования гироскопа. Творческое содружество советских ученых с работниками промышленности, с выдающимися советскими конструкторами и талантливыми инженерами обеспечило оснащение советских космических кораблей, советского морского и воздушного флотов высококачественными гироскопическими приборами и содействовало внедрению гироскопа во многие отрасли нашего народного хозяйства.



III

ПРОЯВЛЕНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

12

Гироскопический эффект в используемых человеком машинах и механизмах

С проявлениями гироскопического эффекта в нашей повседневной жизни мы встречаемся столь часто, что во многих случаях не обращаем на него особого внимания. Например, вряд ли кто-нибудь задумывается над тем, почему при езде на велосипеде человек совершенно инстинктивно смещает тело в сторону желаемого поворота. А между тем мы являемся здесь свидетелями практического использования гироскопического эффекта. Чтобы удостовериться в этом, рассмотрим указанный пример подробнее.

Предположим, что велосипедисту, едущему в направлении *CC* (рис. 33), необходимо произвести поворот в правую сторону. Инстинктивно он смещает центр тяжести своего тела, стремясь как бы повалить машину в сторону желаемого поворота.

Такое отклонение велосипеда от вертикального положения является по существу его поворотом вокруг оси *CC*, происходящим с некоторой угловой скоростью ω. Естественно, что с этой же скоростью будут поворачиваться вокруг оси *CC* и оба велосипедных колеса. Однако вращение со скоростью ω для колес велосипеда не будет единственным, так как при движении они вращаются

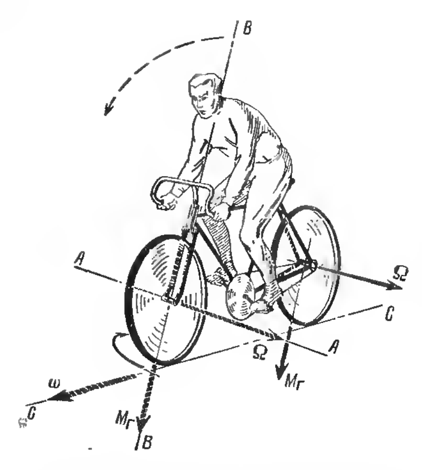


Рис. 33. Проявление гироскопического момента при повороте велосипеда.

еще и вокруг своих осей AA с угловой скоростью Ω. Поэтому, как только велосипеду будет сообщено принудительное вращение вокруг оси CC, возникнут гироскопические моменты, величины которых согласно равенству (3) будут зависеть от момента инерции J колеса относительно оси AA и обеих угловых скоростей Ω и ω.

Гироскопический момент, порождаемый инерцией массы заднего колеса, имеющего только одну степень свободы по отношению к раме велосипеда, будет погашен в подшипниках, жестко в ней закрепленных. Но поведение переднего колеса, имеющего по отношению к раме свободу вращения в рулевой колонке вокруг оси BB, будет иным. Его масса, сопротивляясь изменению положения в пространстве оси AA своего вращения, начнет совершать поворот вокруг оси BB, совпадающей по направлению с действием гироскопического момента $M_г$, т. е. именно в том направлении, которое было необходимо для выполнения правого поворота велосипеда. Тем самым гироскопический момент переднего колеса «помогает» велосипедисту осуществить требуемый поворот.

Описанный эффект наиболее ощутимо проявляется при езде на велосипеде без управления. Многие, конечно, знают, что достаточно незначительно наклонить машину в ту или иную сторону, чтобы совершить поворот. В этом легко можно убедиться, даже и не умея ездить на велосипеде.

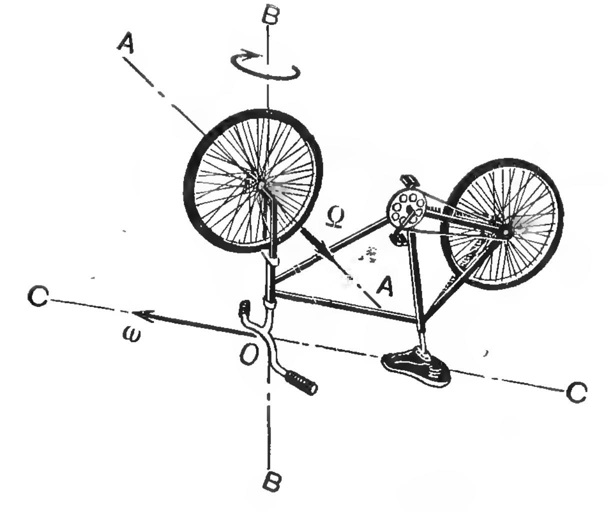


Рис. 34. Опыт с велосипедным колесом.

Поставьте велосипед на пол вверх колесами, как это показано на рис. 34. Раскрутите переднее колесо вокруг оси *AA* с максимально возможной угловой скоростью Ω и попробуйте сообщить раме велосипеда наклон вокруг оси *CC*. Вы убедитесь в том, что переднее колесо почти мгновенно повернется вокруг оси *BB* вилки велосипеда на угол, равный 90°. Этот опыт аналогичен описанному выше эксперименту с лабораторной моделью гироскопа (см. рис. 26).

С проявлением гироскопического эффекта приходится считаться при использовании многих машин и механизмов, имеющих вращающиеся детали, оси которых с течением времени изменяют свое положение в пространстве. Гироскопический эффект широко используется также в разнообразных устройствах, предназначенных для стабилизации тех или иных тел в заданном положении.

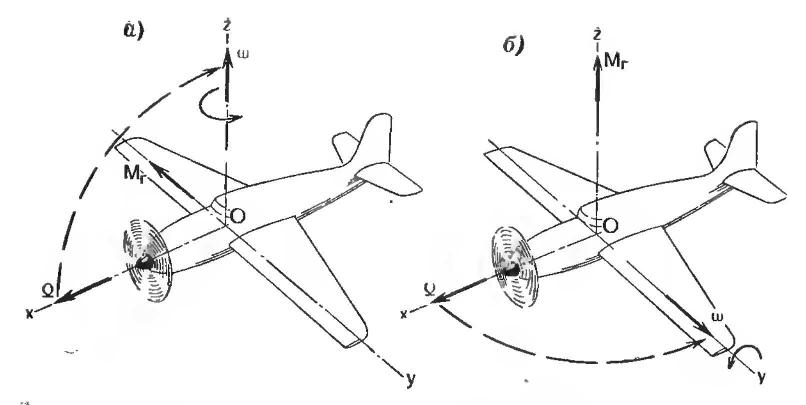


Рис. 35. Проявление гироскопического эффекта при поворотах самолета.

Однако возникновение гироскопического момента не во всех случаях играет положительную роль. Часто он является нежелательным. Так, например, гироскопический момент, возникающий при полете самолета, является одной из причин, порождающих ошибки пилотирования. Одним из источников его возникновения является воздушный винт (рис. 35). Обладая моментом инерции J относительно оси Ox, он при вращении вокруг нее с угловой скоростью Ω развивает большой по величине кинетический момент $J\Omega$. Поэтому всякий раз, как только самолет начинает совершать поворот либо вокруг поперечной оси Oy, либо вокруг курсовой оси Oz, масса винта получает вращение вокруг двух осей одновременно.

Так, при совершении самолетом разворота вокруг оси Oz влево (рис. 35, *а*) его винт будет совершать вращение одновременно вокруг осей Ox и Oz с угловыми скоростями Ω и ω. В итоге движение винта будет происходить с поворотным ускорением, вследствие чего инерция его массы создаст сопротивление указанному вращению. До тех пор

пока гироскопический момент $M_г = J\Omega\omega$, характеризующий величину указанного сопротивления, не погасится летчиком соответствующим поворотом рулей глубины, нос машины будет задираться кверху. Если разворот выполняется вправо, то вследствие инерции массы винта нос самолета будет опускаться вниз.

При поворотах вокруг поперечной оси *Oy*, например, против часовой стрелки (рис. 35, *б*) из-за тех же причин нос самолета будет отклоняться в левую сторону. При противоположном повороте вокруг той же оси он сместится от заданного курса вправо. Вот почему при поворотах самолета приходится применять дополнительные усилия для погашения гироскопических моментов, порождаемых инерцией массы воздушного винта.

На кораблях гироскопический момент может возникать во вращающихся роторах двигателей, паровых турбин, вентиляторов, гребных винтов и т. п. Сосредоточивая мысленно массу всех вращающихся деталей механизмов корабля в роторе его паровой турбины (рис. 36), вращающемся вокруг продольной оси корабля *OA* с угловой скоростью Ω, нетрудно показать, что при поворотах корабля вокруг осей *OB* или *OC* будут возникать явления, аналогичные описанным выше.

Представим себе, что нос судна начал подниматься на волну, в результате чего оно совершает поворот вокруг оси *OB* с некоторой угловой скоростью ω. При этом условии масса ротора турбины будет вращаться одновременно вокруг двух осей *OA* и *OB* с угловыми скоростями Ω и ω.

Инерция массы ротора турбины будет оказывать некоторое сопротивление усилиям, сообщающим ротору вынужденное движение. Стремясь сохранить свое вращение в прежней плоскости (см. рис. 15), масса ротора обусловит отклонение корабля от заданного курса *LK* (рис. 36) влево. Это отклонение будет происходить до тех пор, пока соответствующей перекладкой руля не погасят гироскопи-

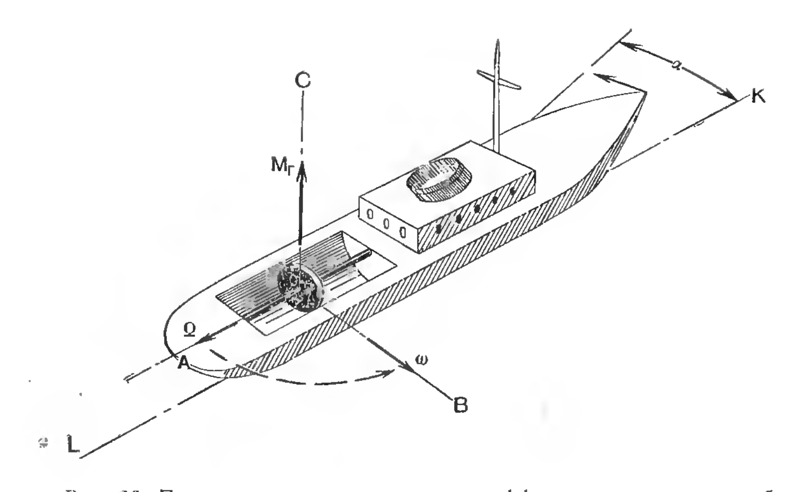


Рис. 36. Проявление гироскопического эффекта при качке корабля.

ческий момент $M_г = J\Omega\omega$. В результате корабль сместится от заданного курса на некоторый угол α.

При обратном движении, когда носовая часть судна будет опускаться вниз, во впадину между двумя гребнями волн, инерция массы ротора турбины вызовет его отклонение от заданного курсового направления LK в правую сторону. При повороте судна в азимуте вокруг оси OC против часовой стрелки носовая часть из-за тех же причин будет зарываться в воду, а при повороте вокруг оси OC по часовой стрелке — подыматься над водой.

Возникновением гироскопического момента объясняется и более интенсивное изнашивание наружного рельса на закруглениях железнодорожных и трамвайных путей. Действительно, при движении вагонов на криволинейных участках пути их колеса получают вращение одновременно вокруг двух осей: оси OA собственного вращения колес (рис. 37) и оси OC, параллельной оси O_1O_1. Указанная ось O_1O_1 расположена перпендикулярно к плоскости ок-

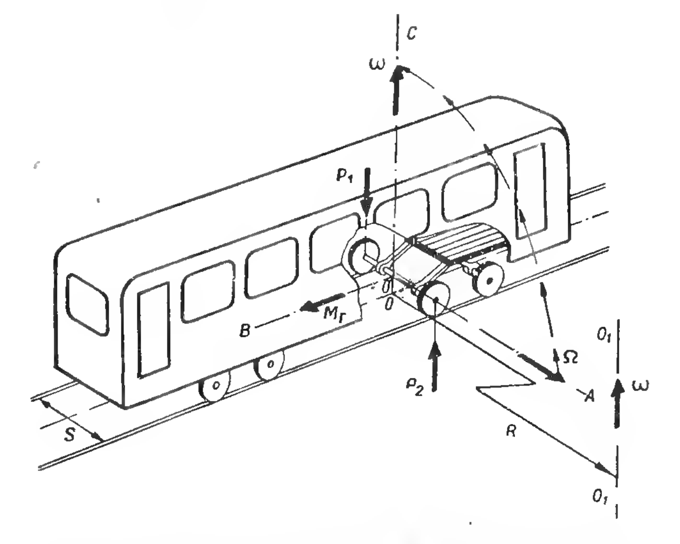


Рис. 37. Возникновение гироскопической реакции при движении вагонов на криволинейных участках железнодорожного пути.

ружности радиусом R, по которой и происходит закругление рассматриваемого криволинейного участка железнодорожного пути. В данном случае гироскопический момент $M_г$ будет зависеть от осевого момента инерции J каждой пары вагонных колес и от угловых скоростей Ω и ω их вращения соответственно вокруг осей OA и OC. Момент $M_г$ будет действовать вокруг продольной оси OB вагона, стремясь совместить ось OA собственного вращения его колес с осью OC их вынужденного поворота, как бы приподнимая тем самым колеса вагона, движущиеся на закруглении пути по внутреннему рельсу.

В результате возникновения гироскопического момента $M_г$ появятся два равных по величине, но противоположных по направлению усилия P_1 и P_2. При ширине железно-

дорожной колеи S указанные усилия согласно формуле (4) будут равны

$$P_1 = P_2 = \frac{M_г}{S} = \frac{J\Omega\omega}{S}.$$

Усилие P_1 (рис. 37) увеличивает давление вагона на наружный рельс, в то время как P_2 уменьшает давление на внутренний рельс. Именно из-за указанного избыточного давления и происходит более интенсивное изнашивание наружного рельса железнодорожного пути на его криволинейных участках.

С гироскопическими явлениями приходится считаться и при работе шариковых подшипников, воспринимающих не только радиальные, но и осевые нагрузки [110]. В таких подшипниках (рис. 38) линия aa, по которой передается давление между внутренними и наружными кольцами, непрерывно изменяет свое положение в пространстве в результате вращения внутреннего кольца подшипника вокруг оси NL. Указанное вращение внутреннего кольца увлекает за собой шарики, которые в этом случае вынуждены вращаться вокруг двух осей одновременно: вокруг оси OC, параллельной оси NL подшипника, с некоторой угловой скоростью ω и вокруг оси OA с угловой скоростью Ω. Эта вторая составляющая вращения шарика вокруг оси OA обусловливается изменением в пространстве положения линии aa, проходящей через точки контакта шарика с кольцами подшипника.

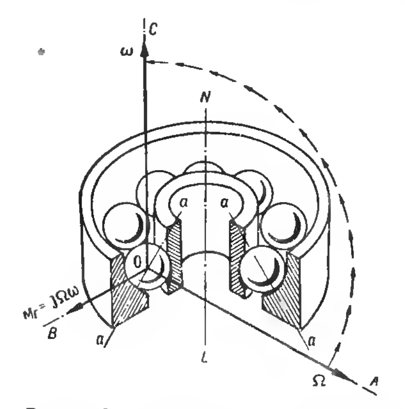


Рис. 38. Проявление гироскопического момента в шариковых подшипниках.

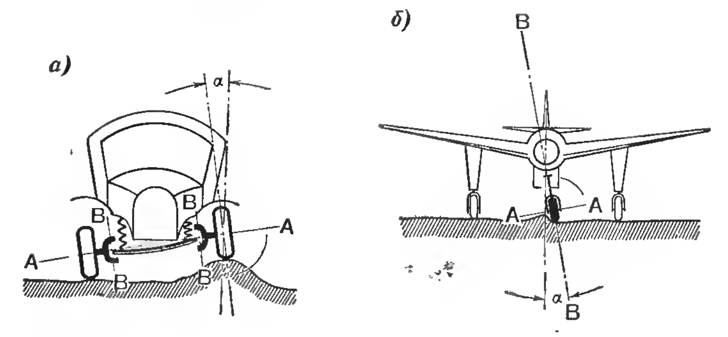


Рис. 39. К объяснению причин возникновения колебаний «шимми».

При вращении шариков вокруг осей OA и OC вследствие инерции их массы возникает момент гироскопической реакции $M_г = J\,\Omega\omega$ тем больший, чем больше момент инерции J каждого шарика и чем выше скорости Ω и ω их вращения. Возникший момент $M_г$ будет стремиться повернуть шарик вокруг оси OB, порождая тем самым дополнительные силы трения в подшипнике. Эти силы при высоких оборотах подшипника могут достигать очень больших значений, вызывая затрату дополнительной энергии на их преодоление.

Серьезные неприятности гироскопический момент принес в свое время автомобилестроителям [80, 94]. При увеличении скорости автомобиля примерно до 70 *км/ч* его передние колеса начинали совершать быстрые колебания одновременно вокруг вертикальных осей BB их поворотных шкворней (рис. 39, *а*) и вокруг горизонтальных осей AA, параллельных плоскости дорожного покрытия. Эти самовозбуждающиеся колебания управляемых колес автомобиля получили характерное название «шимми», подчеркивающее их сходство с эксцентричным танцем того же названия. Аналогичные колебания наблюдаются [97, 143] и у переднего колеса трехколесного шасси само-

лета (рис. 39, *б*) при движении его по посадочной дорожке аэродрома.

В обоих случаях колебания «шимми» — явление отрицательное. Из-за них машина на большой скорости теряла управляемость. В некоторых случаях размахи рассматриваемых колебаний достигали настолько больших значений, что приводили к срыву покрышки с обода колеса и к поломке деталей его крепления.

В чем же крылись причины, порождающие колебания «шимми»? Оказывается, основной из них являлся гироскопический эффект вращающихся колес. Действительно, при наезде автомобиля одним колесом на возвышение (рис. 39, *а*) или при ударе переднего колеса шасси самолета о препятствие (рис. 39, *б*) происходит поворот колеса на некоторый угол α от вертикальной плоскости, перпендикулярной к плоскости чертежа.

Колесу, вращающемуся вокруг оси AA с угловой скоростью Ω (рис. 40), в момент наезда на препятствие сообщается дополнительная угловая скорость ω_B вынужденного поворота вокруг оси CC. Но, как следует из изложенного выше (см. § 10), при сообщении колесу вращения одновременно вокруг двух осей сразу же возникает момент гироскопической реакции $M_г = J\,\Omega\omega_B$. В результате колесо начнет поворачиваться вокруг оси BB, стремясь совместить ось AA своего вращения с осью CC вынужденного поворота. Совершив поворот вокруг оси BB, колесо начнет удаляться от выбранного направления, все более наклоняясь по отношению к вертикальной плоскости. Этому наклону будет способствовать и гироскопический эффект вращающегося колеса.

Действительно, получив в результате возникновения гироскопического момента $M_г$ угловую скорость ω поворота вокруг вертикальной оси BB, колесо начнет поворачиваться одновременно и вокруг оси CC, стремясь совместить ось AA своего вращения с направлением вектора угловой скорости ω.

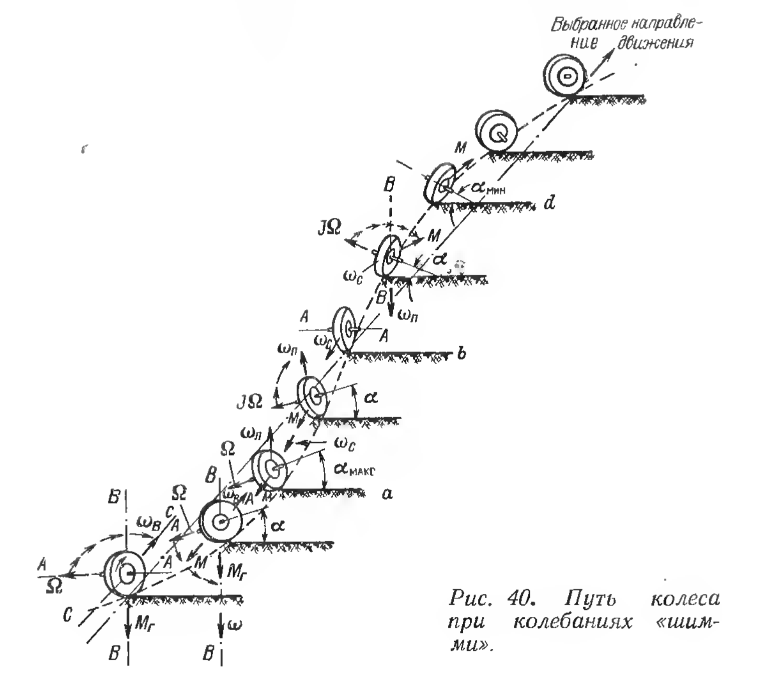


Рис. 40. Путь колеса при колебаниях «шимми».

Однако как только колесо начнет поворачиваться вокруг горизонтальной оси *CC* и тем самым деформировать упругие элементы подвески, сразу же силы упругости рессор автомобиля или стойки переднего колеса самолета начнут создавать момент, стремящийся возвратить колесо в прежнее вертикальное положение. Чем больше угол α поворота колеса по отношению к вертикальной плоскости, тем больше будет величина момента упругих сил. Этот восстанавливающий момент *M* действует на колесо относительно оси *CC* в направлении, в первый момент времени противоположном вектору угловой скорости ω_B вынужденного поворота.

Под влиянием все возрастающего восстанавливающего момента M колесо начнет замедлять свой поворот вокруг вертикальной оси BB и, наконец, в некоторой точке a его угловая скорость ω станет равной нулю. В этот момент времени угол α отклонения колеса от вертикальной плоскости будет максимальным и, следовательно, восстанавливающий момент M будет наибольшим. Теперь на колесо, вращающееся вокруг оси AA с угловой скоростью Ω, действует только восстанавливающий момент M, под влиянием которого колесо получит прецессионное движение вокруг вертикальной оси BB с угловой скоростью $\omega_п$, направление которой противоположно первоначальному повороту колеса, происходившему с угловой скоростью ω.

В результате колесо начнет приближаться к линии выбранного направления движения и тем самым уменьшать угол α своего наклона по отношению к вертикальной плоскости. Иными словами, колесо снова начнет поворачиваться вокруг горизонтальной оси CC с угловой скоростью ω_C, направленной противоположно угловой скорости ω_B первоначального вынужденного поворота. Так же как и в процессе первого этапа рассматриваемого движения колеса, гироскопический эффект будет способствовать уменьшению угла α. Действительно, ось AA, с которой совмещен вектор кинетического момента $J\Omega$ вращающегося колеса, из-за проявления момента гироскопической реакции будет теперь двигаться на совмещение с вектором угловой скорости $\omega_п$ его прецессионного поворота.

Чем ближе подойдет колесо к линии выбранного направления движения, тем меньшим будет восстанавливающий момент M, который при достижении колесом точки b станет равным нулю. Однако ось AA колеса в этот момент неперпендикулярна к линии выбранного направления движения. Поэтому колесо пересечет последнюю и начнет от нее удаляться теперь уже в левую сторону. Удаляясь в сторону от этой линии, колесо вынуждено будет наклоняться по отношению к вертикальной плоскости (см.

рис. 39). При этом в результате деформации рессор возникнет восстанавливающий момент M (рис. 40), стремящийся вернуть колесо в вертикальное положение. Указанное взаимодействие сил вызовет поворот колеса вокруг вертикальной оси BB с угловой скоростью $\omega_п$, вектор которой теперь уже будет направлен по вертикали вниз.

Угловая скорость ω_C поворота колеса вокруг горизонтальной оси CC начнет уменьшаться и в точке d обратится в нуль. Останется воздействие только восстанавливающего момента M, и колесо, все более поворачиваясь вокруг оси BB, начнет вновь приближаться к линии выбранного направления движения, и вся рассмотренная картина передвижения колеса повторится полностью как бы в зеркальном изображении.

Таким образом, взаимодействие момента гироскопической реакции быстро вращающегося колеса с возмущающими и восстанавливающими моментами и вызовет возникновение и поддержание колебаний «шимми» передних колес как автомобиля, так и самолета. Для борьбы с колебаниями «шимми» применяются успокоители, а подвеска передних колес автомобилей выполняется, кроме того, независимой.

13

Гироскопический эффект в явлениях природы

Многие явления, происходящие в природе, получают простое объяснение, если рассматривать их с учетом гироскопического момента, возникающего всякий раз, как только массе того или иного тела сообщается движение с поворотным ускорением. Попытаемся, например, объяснить проявлением гироскопического эффекта общеизвестный факт размыва правых

берегов рек северного полушария, текущих в направлении меридиана.

Предположим, что река A (рис. 41) течет вдоль меридиана к Северному полюсу N. Масса воды, сосредоточенная в некотором объеме D, перемещаясь вдоль меридиана $SKDN$ со скоростью v, совершает тем самым вращение вокруг оси $O_з L$, проходящей через центр Земли $O_з$ перпендикулярно к плоскости меридиана $SKDN$. Угловая скорость Ω этого вращения будет зависеть от радиуса R Земли и равняться $\Omega = v/R$.

Одновременно масса воды совершает вместе с земным шаром еще и непрерывное вращение вокруг земной оси NS. Таким образом, рассматриваемая масса воды, перемещающаяся по руслу реки, совершает вращение одновременно вокруг двух осей: $O_з L$ и NS и, следовательно, движется с поворотным ускорением $w_п$. Учитывая, что суточное вращение Земли происходит с запада на восток, мы должны вектор угловой скорости $\Omega_з$ земного вращения совместить с осью NS и направить его в сторону полюса N.

Пользуясь формулой (2), нетрудно вычислить величину поворотного ускорения $w_п = 2v\,\Omega_з$, направление которого параллельно оси $O_з L$ и тем самым перпендикулярно к плоскости меридиана $NDKS$. Инерция рассматриваемой массы воды будет оказывать сопротивление движению с поворотным ускорением $w_п$. Сила инерции $mw_п$ массы воды, направленная противоположно поворотному ускорению, и будет непосредственно действовать на правый берег реки, размывая и постепенно разрушая его в большей степени, чем левый.

Проявлением гироскопического эффекта объясняются также направления некоторых ветров и морских течений. Известно, что в местностях, расположенных ближе к экватору, Солнце обогревает земную поверхность и окружающую ее воздушную оболочку более интенсивно, чем в районах, находящихся в высоких широтах. Вследствие этого

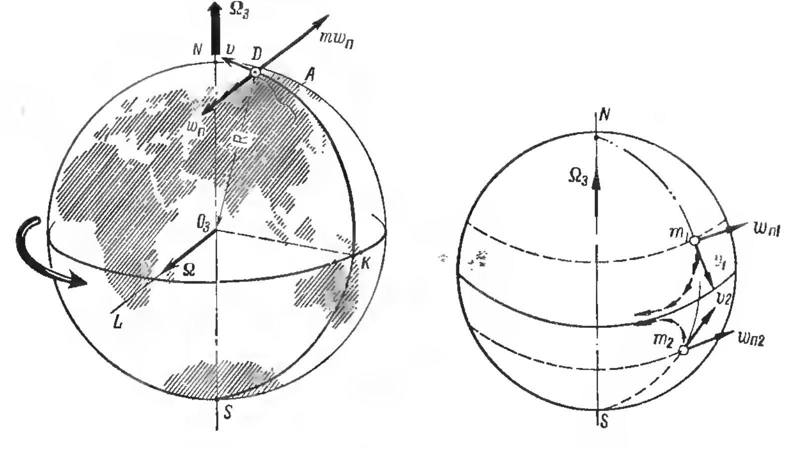


Рис. 41. К объяснению причин размывания правых берегов рек северного полушария.

Рис. 42. Образование пассатов.

массы воздуха у экватора, имея более высокую температуру, подымаются кверху, а им на смену поступают холодные потоки воздуха из высоких широт. Такое движение слоев воздуха в сторону экватора, протекающее в непосредственной близости у поверхности Земли, продолжается непрерывно, порождая тем самым постоянные ветры, дующие со скоростью 6—7 *м/сек*.

Однако направление этих ветров не совпадает точно с плоскостью меридиана. Участвуя вместе с Землей в ее суточном вращении вокруг оси NS (рис. 42) с угловой скоростью Ω_3, массы воздуха m_1 и m_2, условно ограниченные на схеме шаровыми объемами, перемещаются одновременно и относительно земной поверхности со скоростями v_1 и v_2. Тем самым они оказываются в условиях движения с поворотными ускорениями $w_{п1}$ и $w_{п2}$, направленными к востоку.



Инерция масс воздушных потоков, оказывая сопротивление силам, порождающим поворотное ускорение, обусловит постепенное их отклонение к западу. Так возникают постоянно дующие у экватора в направлении на запад ветры, получившие название **пассатов**.

Перемещаясь вдоль экватора, пассаты увлекают за собой поверхностные воды океанов, образуя экваториальное течение, направленное с востока на запад (рис. 43). Достигая материков Земли, это течение разветвляется на северное и южное, по которым теплые воды тропиков устремляются в более холодные районы высоких широт. По тем же причинам, которые вызывают размыв правых берегов рек северного полушария и возникновение пассатов, массы морской воды, перемещающиеся от экватора к географическим полюсам, начинают постепенно отклоняться от меридионального направления. Так, например, теплые воды, движущиеся от экватора к Южному полюсу *S*, следуя вначале вдоль восточных берегов материков Земли, постепенно смещаются

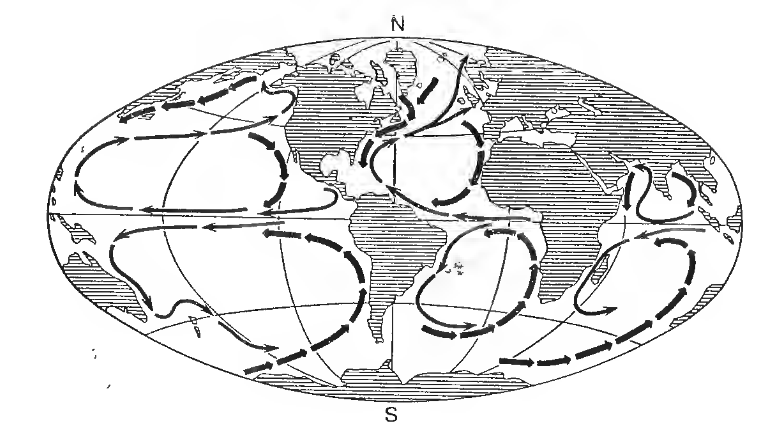


Рис. 43. Карта направлений главнейших морских течений.
Тонкие стрелки — теплые течения; жирные стрелки — холодные течения.

влево. Охлаждаясь в высоких широтах южного полушария, они достигают западных берегов материков и, двигаясь далее к экватору, начинают вновь отклоняться влево, вливаясь в экваториальное течение.

Воды, перемещающиеся от экватора к Северному полюсу N, непрерывно отклоняясь вправо, пересекают океаны и продолжают свое течение вдоль западных берегов Европы и Северной Америки. Та часть потока, которая смещается при этом к югу, начиная вновь отклоняться вправо, постепенно вливается в экваториальное течение. Вторая часть потока, движущаяся на север, охлаждается в полярных районах и, возвращаясь обратно в низкие широты и также отклоняясь вправо, омывает восточные берега материков.

Характер циркуляции воды в морях и океанах, так же как и возникновение пассатов, объясняется проявлением гироскопического эффекта у масс воды и воздуха, вынужденных перемещаться с поворотным ускорением.



В качестве еще одного примера проявления гироскопического эффекта в природе можно указать на отклонения циклонов к географическим полюсам. Циклон, как известно, представляет собой вихревое движение воздуха вокруг более или менее вертикальной оси. При этом направление вращения воздуха вокруг оси циклона зависит от его местоположения на земной поверхности. Если циклон возник в северном полушарии, то вращение воздуха вокруг его оси (при взгляде сверху, из мирового пространства), будет происходить против часовой стрелки. Если же место зарождения циклона — южное полушарие, то вращение воздуха вокруг оси циклона при тех же условиях наблюдения будет происходить по часовой стрелке.

Пользуясь схемой (рис. 44), нетрудно заметить, что направление вращения масс воздуха вокруг оси циклона совпадает с направлением проекции вектора угловой скорости $\Omega_з$ суточного вращения Земли на вертикаль данного места. Массы воздуха, вращаясь вокруг оси циклона, участвуют одновременно и в суточном вращении Земли вокруг ее оси *NS*. Вследствие присущей им инерции массы воздуха, захваченные циклоном, будут оказывать сопротивление силам, порождающим их движение с поворотным ускорением, стремясь совместить вектор угловой скорости $\omega_ц$ собственного вращения вокруг оси циклона с вектором угловой скорости $\Omega_з$ их вынужденного поворота вокруг земной оси *NS*. Как видим, в наблюдаемых откло-

нениях большинства циклонов северного полушария к Северному полюсу N, а циклонов южного полушария к Южному полюсу S большое значение имеет гироскопический эффект.

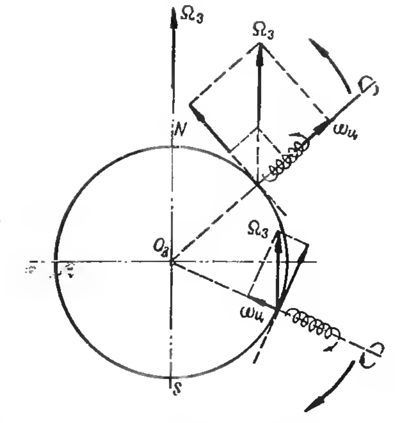


Рис. 44. Схема отклонения циклонов к географическим полюсам.

Гироскопический эффект вообще играет весьма существенную роль в жизни Вселенной, так как все звезды и планеты, в том числе и наша Земля, непрерывно вращаются вокруг своих осей как огромные естественные шарообразные волчки. В свою очередь и электроны, перемещающиеся по сферическим поверхностям вокруг ядра атома [144, стр. 13], быстро вращаясь вокруг своих осей, ведут себя как чрезвычайно микроскопические волчки. Развиваемый ими при этом вращении кинстический момент (см. § 11), или, иначе говоря, собственный момент количества движения, принято называть спином[1].

Вращение является основной, необходимой формой движения всех, как писал Ф. Энгельс, «парящих в мировом пространстве тел»[2]. Даже Солнце, вокруг которого обращаются планеты и звезды солнечной системы, совершает непрерывное величавое вращение. Благодаря суточному вращению Земли ее ось NS сохраняет стабильное положение в пространстве аналогично главной оси лабораторного гироскопа (см. рис. 32) в том случае, когда на него не действуют моменты внешних сил.

---

[1] От английского *to spin* — кружить, вертеть.

[2] Ф. Энгельс, Диалектика природы. М., Политиздат, 1969, стр. 239.

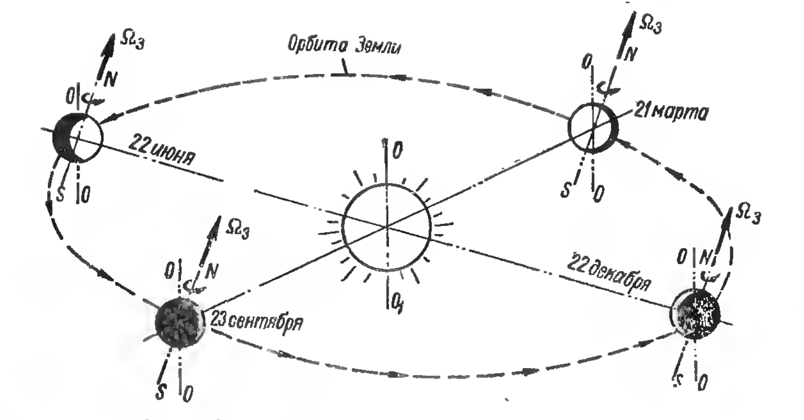


Рис. 45. Схема движения Земли вокруг Солнца.

Благодаря стабильному положению земной оси NS в мировом пространстве (рис. 45) и постоянству угловой скорости Ω_3 ее суточного вращения, равной, как известно, одному обороту за 24 часа, происходит закономерная смена дня и ночи. По этим же причинам при годовом перемещении Земли по ее орбите вокруг Солнца на земной поверхности происходит регулярная смена времен года.

Вследствие стабильности направления земной оси NS в зимние месяцы из-за ее наклона к плоскости земной орбиты Солнце освещает районы высоких широт северного полушария значительно меньше 12 часов. За Северным же полярным кругом оно вообще не подымается над горизонтом, и там стоит полярная ночь, в то время как за Южным полярным кругом в эти месяцы Солнце освещает земную поверхность круглые сутки.

22 декабря продолжительность дня в северном полушарии наименьшая. Затем день начинает постепенно прибывать, и 21 марта его продолжительность становится равной продолжительности ночи. Увеличение дня будет проис-

ходить непрерывно вплоть до 22 июня. В эти месяцы Солнце круглые сутки освещает земную поверхность за Северным полярным кругом, в то время как за Южным полярным кругом стоит полярная ночь. После 22 июня день в северном полушарии начнет убывать, его продолжительность 23 сентября снова станет равной продолжительности ночи и далее будет все больше и больше уменьшаться вплоть до 22 декабря, т. е. до того дня, когда описанный цикл начнет повторяться.

Гироскопический эффект вращающейся Земли проявляется не только в смене дня и ночи, а также времен года. Он играет существенную роль в процессе весьма медленного изменения в пространстве положения земной оси под влиянием сил притяжения, порождаемых массами Луны и Солнца. Еще в 1687 г. И. Ньютон доказал, что все тела в какой бы части мирового пространства они ни находились, взаимно притягиваются друг к другу. Сила их притяжения тем больше, чем меньше между ними расстояние и чем больше их массы. Наибольшее влияние на земной шар оказывают силы притяжения, порождаемые массами Солнца и Луны, по сравнению с которыми силы притяжения других планет пренебрежимо малы.

Если бы Земля имела форму идеального шара с равномерно распределенной массой, то равнодействующая сила притяжения и Солнца C, и Луны L проходила бы точно через центр Земли $O_З$ (рис. 46, *а*) и не создавала бы относительно последнего внешних моментов. Но Земля, как известно, имеет форму приблизительно схожую с шаром, по экватору которого как бы расположен утолщающий пояс, постепенно уменьшающийся к географическим полюсам. Такое утолщение на экваторе можно для упрощения представить себе в виде четырех сконцентрированных в одинаковых шаровых объемах масс равной плотности и расположенных на равных расстояниях от центра Земли $O_З$ по двум взаимно перпендикулярным диаметрам, лежащим в плоскости ее экватора (рис. 46, *б*).

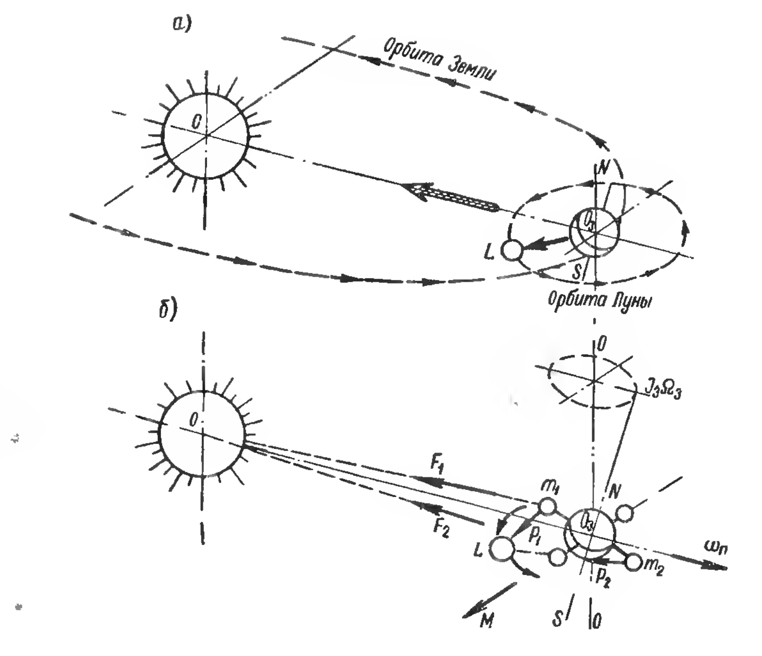


Рис. 46. Схема прецессионного движения Земли.

Пользуясь указанной схемой, нетрудно убедиться в том, что масса m_1, составляющая одну четвертую часть всей массы утолщающего пояса, расположена ближе к Солнцу, чем такая же по величине масса m_2, но находящаяся на диаметрально противоположной стороне плоскости экватора. А так как расстояние Cm_1 меньше расстояния Cm_2, то согласно закону Ньютона сила притяжения F_1 больше силы F_2. Следовательно, равнодействующая этих двух сил уже не будет проходить через центр Земли O_3.

Аналогичным образом на массы m_1 и m_2 будут действовать силы P_1 и P_2 притяжения Луны, так как и в этом

случае расстояния Lm_1 и Lm_2 не равны друг другу. Неравенство между силами F_1 и F_2, а также между P_1 и P_2 породит момент M, действующий на земной шар по оси, перпендикулярной к диаметру m_1m_2 и лежащей в плоскости экватора.

Указанный момент M, действуя на земной шар, вызовет его прецессионное движение, в результате которого вектор угловой скорости Ω_3 Земли будет стремиться к совмещению с вектором внешнего момента M. Так как в процессе обращения вокруг Солнца и Земля, и Луна непрерывно изменяют свое положение в пространстве, то, естественно, будет непрерывно изменяться и направление вектора момента M действующих на земной шар сил притяжения Луны и Солнца. При описанном воздействии сил притяжения земная ось NS совершает вокруг оси OO, проходящей через центр Земли O_3, сложное конусообразное движение. Угловая скорость такого прецессионного движения земного шара, согласно формуле (7) равная $\omega_п = \frac{M}{J_3\Omega_3}$, будет ничтожно мала вследствие огромного значения момента инерции J_3 Земли относительно ее оси NS. Время одного полного оборота Земли вокруг оси OO составляет приблизительно 26 000 лет.

Хотя описанное прецессионное вращение Земли и происходит чрезвычайно медленно, оно оказывает непосредственное влияние на жизнь нашей планеты. Постепенный поворот земной оси NS в пространстве изменяет положение отдельных областей земной поверхности относительно звезд и планет Вселенной. Если наши древние предки, проживавшие шесть тысяч лет назад на широте теперешней Москвы, могли наблюдать в небе созвездие Креста, то наше поколение не имеет возможности его видеть даже в южных районах Советского Союза. Если две тысячи лет тому назад Большая Медведица являлась для района южной Греции незаходящим созвездием, то для современ-

ных греков его звезды оказываются скрытыми за горизонтом.

Однако еще более важным является то обстоятельство, что при описанном изменении направления оси NS изменяется и наклон поверхностей отдельных областей Земли относительно направления солнечных лучей. Чем перпендикулярнее эта поверхность к лучам Солнца, тем теплее климат в данной области. Именно поэтому в результате прецессионного движения земного шара климат в различных его районах постепенно изменяется. В одних он становится теплее, в других — суровее, что, естественно, сказывается непосредственно на развитии жизни в отдельных областях земного шара.

Гироскопический эффект, обусловленный суточным вращением Земли, оказывает свое влияние и на величину приливных колебаний уровня моря, порождаемых силами притяжения, существующими, как об этом уже говорилось выше, между массами Солнца, Луны и других планет и массой Земли. Взаимодействуя между собой, Солнце и Земля, так же как Земля и Луна, представляют единые системы, непрерывно вращающиеся в пространстве вокруг осей, проходящих через центры масс каждой такой системы. Так, например, Земля и Луна L (рис. 47) совершают совместное вращение в пространстве вокруг оси EE, проходящей через центр O их суммарной массы. Последний удален от центра $O_З$ Земли на расстояние l, равное 0,73 земного радиуса R [87].

В процессе описанного вращения, период которого равен одному месяцу, массы m_i отдельных объемов воды, согласно изложенному в § 8, будут двигаться с центростремительным ускорением $w_{цi} = v_i \omega$, порождая тем самым центробежные силы инерции

$$Q_i = m_i v_i \omega = m_i \omega^2 \rho,$$

тем бóльшие, чем больше масса m_i рассматриваемого объема воды и чем на большее расстояние ρ она удалена

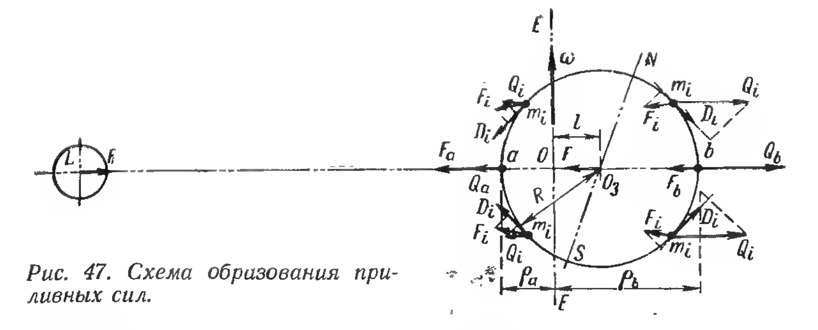


Рис. 47. Схема обризования приливных сил.

от оси EE, вокруг которой система Земля—Луна вращается с угловой скоростью ω. Нетрудно заметить, что один и тот же объем воды в разных пунктах земной поверхности будет порождать различные по величине центробежные силы инерции. Так, масса m_i воды, сосредоточенная в точке a, будет порождать центробежную силу инерции $Q_a = m_i\omega^2(R-l)$, почти в три раза меньшую, чем сила $Q_b = m_i\omega^2(R+l)$, обусловливаемая такой же массой m_i воды, расположенной в районе точки b.

В свою очередь и сила притяжения F_i, действующая со стороны Луны L на отдельные массы воды, будет изменять свое значение в зависимости от расположения этих масс на земной поверхности. Так, если некоторый объем воды, обладающий массой m_i, представить себе размещенным в центре O_3 Земли, то на эту массу будет воздействовать сила притяжения F. На тот же объем воды, сосредоточенный в точке a, будет действовать сила притяжения F_a, бóльшая, чем F, так как точка a расположена к центру Луны L ближе, чем центр O_3 земного шара. В точке же b, удаленной от Луны L на большее расстояние, чем O_3, на массу m_i будет действовать сила притяжения F_b, величина которой меньше F.

В общем случае масса m_i того или иного объема воды, расположенного в любой точке земной поверхности, будет

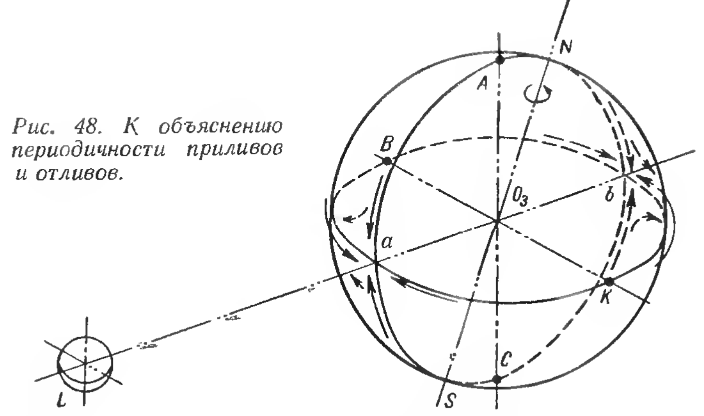


Рис. 48. К объяснению периодичности приливов и отливов.

порождать центробежную силу инерции Q_i. При этом на рассматриваемую массу m_i будет действовать сила притяжения F_i, направленная к центру Луны L. Как видно непосредственно из схемы, силы Q_i и F_i проектируются на плоскость горизонта, перпендикулярную к земному радиусу, проведенному из центра $O_З$ Земли в центр рассматриваемой массы m_i. Эти горизонтальные составляющие D_i и вызывают движение воды морей и океанов к точкам a и b пересечения земной поверхности прямой $LO_З$, соединяющей центры Луны L и Земли $O_З$ (рис. 48).

Таким образом, в результате сгона воды в направлениях к точкам a и b уровень воды в океане повышается вокруг этих точек и понижается вдоль пояса, центральная линия которого проходит через точки A, B, C и K. Если бы Земля не имела суточного вращения вокруг оси NS, то в точках a и b стояла бы полная вода, или, иными словами, был бы максимальный прилив [126]. В точках же A, B, C и K стояла бы малая вода, соответствующая максимальному отливу.

Однако в действительности Земля за одни сутки делает полный оборот вокруг своей оси NS. Поэтому меридиан



Рис. 49. Рыбачья лодка, осевшая на камень при отливе.

любой точки земной поверхности один раз в сутки будет совмещаться с точкой a и один раз с точкой b, причем интервал между этими совмещениями будет равен 12 часам (см. рис. 3). Вот почему в каждом районе Земли уровень моря два раза в сутки достигает наивысшего положения. Соответственно также два раза в сутки при совмещении данного меридиана с точками K и B (рис. 48) уровень моря в рассматриваемом районе будет снижаться до наинизшего положения.

В процессе описанных приливно-отливных перемещений воды морей и океанов их массам вследствие суточного вращения Земли приходится двигаться с поворотным

ускорением. При этом массы объемов воды, двигающиеся севернее плоскости LO_3K, по аналогии с течениями воды в океанах (см. рис. 43) будут отклоняться вправо, а при перемещениях южнее той же плоскости LO_3K — влево. В результате такого проявления гироскопического эффекта в одних прибрежных районах колебания уровня моря при приливах и отливах будут увеличиваться, в других — уменьшаться. Вот почему разность высот между малой и полной водой у побережий нередко составляет 5—6 *м* (рис. 49), а в некоторых местах достигает даже 18 *м*.

14

Вращение в пространстве плоскостей горизонта и меридиана. Поведение свободного гироскопа у поверхности Земли

Суточное вращение Земли оказывает свое влияние не только на смену дня и ночи, чередование времен года, направление морских течений и образование подобных им явлений, описанных в предыдущем параграфе. Даже живые организмы, обитающие на земном шаре, испытывают на себе его влияние. При этом, как показывают наблюдения, указанное влияние проявляется в большей или меньшей степени в зависимости от того, в каком районе нашей планеты то или иное живое существо находится. Последнее обстоятельство объясняется различными величинами угловых скоростей вращения в пространстве плоскостей горизонта и меридиана отдельных пунктов земной поверхности. И весьма характерно, что закономерности изменения этих угловых скоростей наиболее наглядно можно изучить с помощью гироскопа.

Выше уже говорилось, что свободный гироскоп, установленный на экваторе в таком положении, когда в на-

чальный момент времени его главная ось расположена горизонтально и направлена с запада на восток (см. рис. 11), непрерывно отклоняется от плоскости горизонта, поворачиваясь вокруг неподвижной относительно Земли точки своего подвеса с угловой скоростью, равной скорости суточного вращения Земли. Иначе говоря, человек, находящийся на земной поверхности рядом с гироскопом, с первого же мгновения будет наблюдать подъем восточного конца его главной оси над плоскостью горизонта. И, следовательно, по величине угла между главной осью гироскопа и плоскостью горизонта наблюдающий может составить суждение о скорости вращения в пространстве, в данном случае, плоскости горизонта.

Поскольку гироскоп сохраняет направление своей главной оси стабильным в пространстве, то описанный уход ее по отношению к земным ориентирам принято называть в и д и м ы м у х о д о м. Заметим, что последний при определенных условиях может отсутствовать. Действительно, предположим, что в начальный момент времени главная ось гироскопа, расположенного на экваторе, горизонтальна и совмещена с плоскостью меридиана (рис. 50). При этом условии гироскоп в результате вращения Земли будет переноситься вокруг ее оси *NS* параллельно самому себе, и, следовательно, его главная ось останется все время параллельной полуденной линии и тем самым сохранит неизменное положение относительно плоскостей горизонта и меридиана.

Иная картина будет наблюдаться при установке гироскопа на географических полюсах. В этих пунктах земной поверхности свободный гироскоп сохраняет свое положение неизменным относительно плоскости горизонта, но зато непрерывно отклоняется от плоскости меридиана с угловой скоростью суточного вращения Земли. Действительно, установим свободный гироскоп на Северном полюсе таким образом, чтобы его главная ось в начальный момент времени была параллельна плоскости горизонта

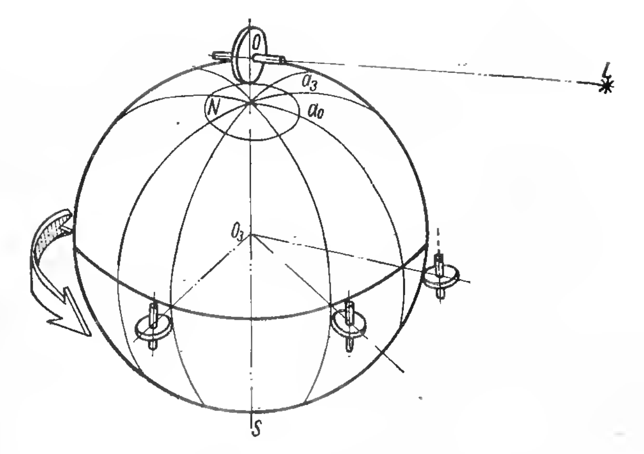


Рис. 50. Видимый уход гироскопа, установленного на полюсе.

и совмещена с направлением OL на неподвижную звезду L. Пусть проекция направления OL на плоскость горизонта в начальный момент времени совпадает с направлением меридиана Na_0.

Участвуя в суточном вращении Земли, прямая Na_0 будет непрерывно отходить от первоначального направления OL, совершая поворот вокруг земной оси NS с угловой скоростью суточного вращения. В результате такого движения прямая Na_0 по прошествии трех часов займет новое положение Na_3, в то время как главная ось гироскопа, оставаясь неизменной в пространстве, по-прежнему будет совмещена с направлением OL. С течением времени линия Na_0 будет все более и более отклоняться к востоку от направления OL и только по прошествии 24 часов вновь совместится с исходным положением.

Сопоставляя между собой рассмотренные случаи видимого ухода свободного гироскопа, приходим к выводу, что угловая скорость отклонения его главной оси от плоскости

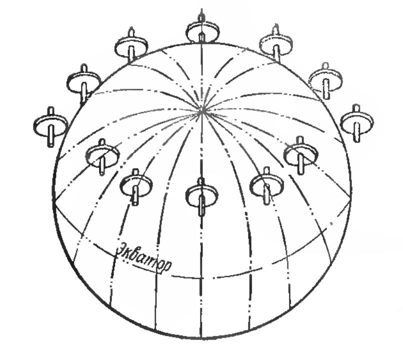


Рис. 51. *Видимый уход гироскопа при установке его в любом пункте земной поверхности.*

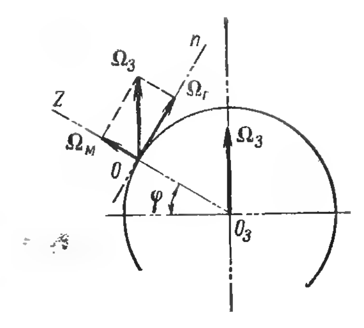


Рис. 52. *Угловые скорости вращения в пространстве плоскостей горизонта и меридиана.*

горизонта достигает максимума, равного угловой скорости суточного вращения Земли, на экваторе и становится равной нулю на полюсах. Угловая же скорость видимого ухода относительно плоскости меридиана равна нулю на экваторе и достигает максимума, равного угловой скорости суточного вращения Земли, на полюсах. Во всех других случаях, когда свободный гироскоп установлен на земной поверхности под любой промежуточной географической широтой (рис. 51), его видимый уход будет иметь место относительно обеих плоскостей — как горизонта, так и меридиана, которые в общем случае непрерывно вращаются в пространстве.

Угловые скорости их вращения зависят от географической широты φ точки O земной поверхности (рис. 52) и определяются проекциями $\Omega_г$ и $\Omega_м$ угловой скорости $\Omega_з$ суточного вращения Земли соответственно на полуденную линию On и вертикаль OZ. С угловой скоростью $\Omega_г$ совершает вращение в пространстве вокруг полуденной линии

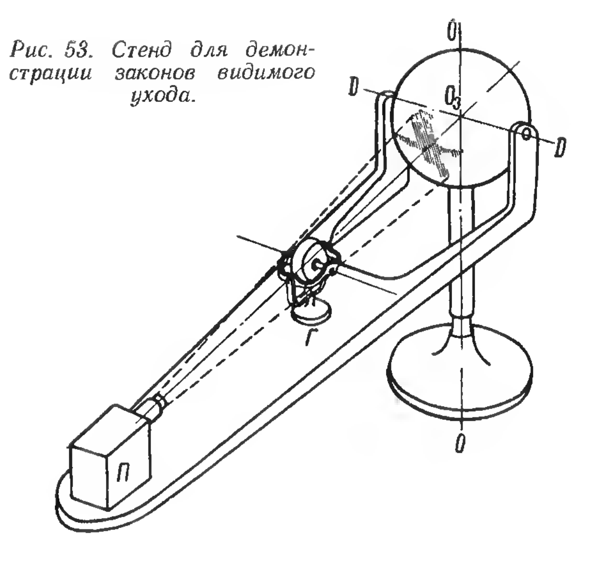


Рис. 53. Стенд для демонстрации законов видимого ухода.

Оп плоскость горизонта, а со скоростью $\Omega_м$ — плоскость меридиана вокруг вертикали *OZ* данного места.

Изложенные законы видимого ухода свободного гироскопа относительно плоскостей горизонта и меридиана могут быть наглядно продемонстрированы с помощью специальных установок. Одна из них состоит из платформы, свободно вращающейся на подшипниках вокруг вертикальной оси *OO* (рис. 53), являющейся одновременно и осью глобуса, шарнирно соединенного по оси *DD* с платформой.

На платформе смонтированы гироскоп *Г*, обладающий тремя степенями свободы, и проектор *П*, пучок световых лучей которого, освещая гироскоп, проектирует контуры последнего на поверхность глобуса (рис. 54). Шарнир, благодаря которому платформа имеет свободу вращения вокруг оси *DD*, проходящей через центр $O_з$ глобуса, позволяет проектировать теневое очертание гироскопа на



Рис. 54. Теневая проекция контура гироскопа на глобусе.



Рис. 55. Глобус с гироскопом.

любое место поверхности глобуса. Таким образом, поворот платформы вокруг оси DD на тот или иной угол как бы создает возможность устанавливать точку подвеса гироскопа на поверхности глобуса под любой географической широтой.

Кроме того, в начальный момент времени гироскопу может быть придано самое различное положение по отношению к платформе. Его можно устанавливать на платформе таким образом, чтобы главная ось в начальный момент была расположена горизонтально, т. е. перпендикулярно к радиусу глобуса, и направлена либо с востока на запад, либо с севера на юг. Наконец, главной оси можно придавать вертикальное положение, совмещая ее с направлением радиуса глобуса.

По аналогичному принципу построена и другая установка (рис. 55). Она состоит из глобуса большого диаметра, на поверхности которого установлен гироскоп с тремя степенями свободы. Точка его подвеса может перемещаться вдоль меридиана глобуса от экватора до

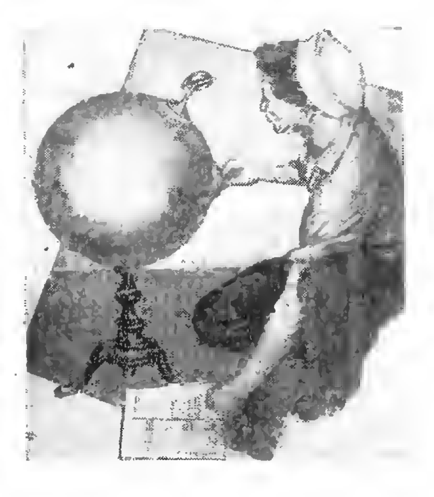


Рис. 56. Работа на стенде при изучении поведения гироскопа на земной поверхности.

полюса. При этом главной оси можно придавать любые положения по отношению к поверхности глобуса.

Пользуясь описанными стендами, и представляется возможным осуществлять изучение законов поведения гироскопа у земной поверхности весьма наглядными методами. В обеих установках ось гироскопа сохраняет стабильным свое положение в пространстве. Поэтому при вращении глобуса вокруг вертикальной оси гироскоп будет принимать все новые и новые положения по отношению к поверхности глобуса. В первой установке при вращении глобуса наблюдают за непрерывными изменениями теневой проекции гироскопа на поверхности глобуса (рис. 54), во второй — за непосредственными изменениями положения главной оси гироскопа относительно поверхности глобуса (рис. 56).

По результатам таких наблюдений и составляют суждение об угловых скоростях видимого ухода свободного гироскопа относительно плоскостей горизонта и меридиана любого выбранного на земной поверхности пункта.

Описанные стенды получили широкое распространение в училищах, подготавливающих штурманов для морского и воздушного флотов. Они позволяют наглядно изучать сложные изменения главной оси гироскопа, сохраняющего неизменным свое положение в пространстве относительно земного шара, совершающего суточное вращение.

15

Проявление гироскопического эффекта в живых организмах

Широко известно, что человек, двигающийся по земной поверхности при отсутствии видимости каких-либо ориентиров, как это бывает, например, в пургу (рис. 57), в тумане, в беззвездную ночь и в других подобных им условиях, начинает постепенно отклоняться от первоначально выбранного направления. Незаметно для себя пешеход двигается по окружности и по прошествии некоторого времени возвращается, к своему удивлению, в исходный пункт. Весьма характерно, что такое блуждание путников по кругу совершается в северном полушарии всегда вправо, а в южном — влево.



Рис. 57. Проявление гироскопического эффекта при движении человека по земной поверхности.

Для выяснения причины этого явления представим себе, что пешеход, находящийся в северном полушарии, начал движение со скоростью v в направлении OL, составляющем некоторый угол с плоскостью меридиана. Но последняя, как было показано выше (см. рис. 52), совершает вместе со всеми предметами и живыми существами, находящимися в данном пункте земной поверхности, непрерывное вращение вокруг вертикали места с угловой скоростью $\Omega_м$.

Таким образом, человек не только перемещается со скоростью v по земной поверхности, но еще и вращается вместе с ней в мировом пространстве вокруг вертикали места с угловой скоростью $\Omega_м$ (рис. 57). Тем самым он вынужден двигаться с поворотным ускорением $w_п$, вектор которого, согласно изложенному в § 9, направлен в левую сторону от направления движения OL.

Естественно, что масса человека, как и масса любого другого тела, будет оказывать сопротивление силам, порождающим движение с поворотным ускорением. Возникающий при этом в организме человека момент гироскопической реакции будет способствовать сохранению пешеходом прямолинейного движения в пространстве. Вот почему человек (аналогично движущейся элементарной массе; см. рис. 15) начнет постепенно отклоняться от выбранного на земной поверхности направления движения, характеризуемого прямой OL (рис. 57), непрерывно вращающейся в пространстве вместе с плоскостью меридиана.

Гироскопический эффект, обусловливаемый суточным вращением Земли, оказывает определенное влияние и на количество появлений в различных странах нашей планеты людей с более развитой левой рукой. Число левшей, как показывает статистика [102, 125], в южном полушарии значительно больше, чем в северном. Объясняется это тем, что ребенок, только что начинающий ползать, уже испытывает на себе влияние поворотного ускорения. В самом деле, представим себе малыша, ползающего по земле

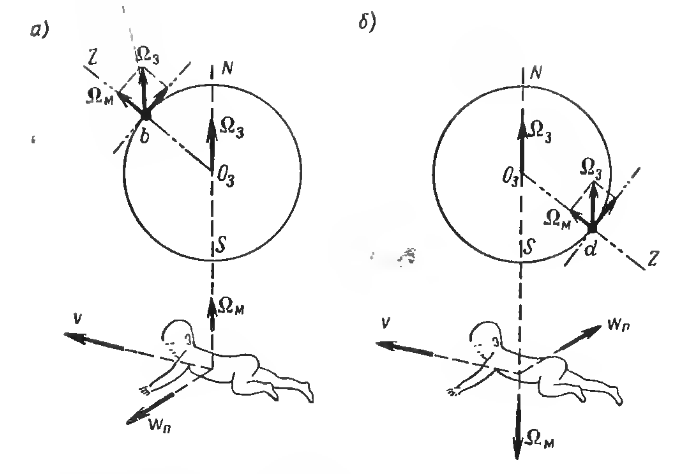


Рис. 58. Влияние гироскопического эффекта на появление правшей и левшей.

с некоторой скоростью v. Естественно, что в это же время он участвует и в суточном вращении Земли, поворачиваясь вокруг вертикали $O_з Z$ данного места с угловой скоростью $\Omega_м$.

Для малыша, находящегося в северном полушарии, например в точке b (рис. 58, *а*), это вращение вокруг вертикали $O_з Z$ будет происходить против часовой стрелки. Действительно, вектор угловой скорости $\Omega_з$ суточного вращения Земли будет давать на вертикаль $O_з Z$ составляющую $\Omega_м$, вектор которой направлен вверх, в сторону зенита Z. Если же ребенок будет находиться в южном полушарии, например в точке d (рис. 58, *б*), то его вращение вокруг вертикали $O_з Z$ будет происходить уже в противоположном направлении, т. е. по часовой стрелке.

В силу этих обстоятельств ребенок, перемещающийся по земной поверхности в северном полушарии (рис. 58, *а*),

будет вынужден двигаться с поворотным ускорением $w_п$, направленным в левую сторону относительно выбранного направления движения. Указанное ускорение воспринимается малышом как сила, стремящаяся повалить его на правый бок. Противодействуя ей, ребенок начинает с усилием опираться о землю правой рукой. В южном же полушарии (рис. 58, *б*) ребенок, ползая, заваливается на левый бок и ему для сохранения равновесия приходится опираться о поверхность своего перемещения уже левой рукой. Вот почему в первые годы жизни малыши северного полушария больше работают правой рукой, а дети южного полушария — левой.

Конечно, на преимущественное развитие у человека правой или левой руки влияют многие факторы [137]. Наследственность, установившиеся традиции, уклад жизни, выработанные веками приемы обращения с воинским оружием, орудиями труда и музыкальными инструментами — все это оказывает свое влияние на более интенсивное развитие правой или левой руки человека. Однако среди перечисленных причин гироскопический эффект, обусловленный суточным вращением Земли, имеет далеко не маловажное значение.

Действительно, несмотря на то, что выработанные приемы и применяемые орудия труда повсеместно заставляют человека больше работать правой рукой, количество левшей в южном полушарии нашей планеты достигает значительной величины. Если число людей с более развитой левой рукой в странах северного полушария не превышает 2—6% от общего количества их населения, то в странах южного полушария, например в Австралии, количество левшей достигает уже 26%, а в Южной Африке этот показатель еще выше [125].

Человеческий организм обладает повышенной чувствительностью к претерпеваемым им ускорениям благодаря тому, что наше ухо, устройство которого схематически показано на рис. 59, предназначено не только для восприятия

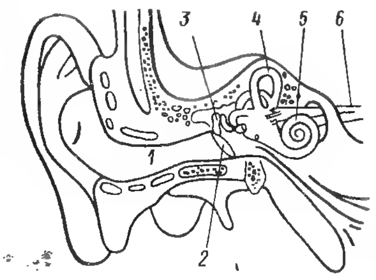


Рис. 59. Строение уха человека.

звука, но и для управления положением тела в пространстве. Звук, поступающий в слуховой проход *1* наружного уха, вызывает колебания барабанной перепонки *2*, герметически отделяющей среднее ухо от внешней среды. Эти колебания посредством слуховых косточек *3* передаются барабанной полости и улитке *5*, которые расположены уже во внутреннем ухе. В результате описанного воздействия происходят изменения давлений воздуха, находящегося внутри первой из них, и жидкости, содержащейся во второй. Эти изменения давления жидкости в улитке *5* и передаются улитковой частью слухового нерва *6* в мозг. Таков в самых общих чертах слуховой аппарат человека.

Во внутреннем ухе находится еще и так называемый в е с т и б у л я р н ы й а п п а р а т. Он состоит из трех полукружных каналов *4*, расположенных в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Каждый такой канал обоими своими концами соединен с общим резервуаром, носящим название преддверия. Внутренние полости преддверия и полукружных каналов заполнены жидкостью — эндолимфой, в которую погружены окончания чувствительных волокон вестибулярной части слухового нерва *6*.

В случае ускорения, претерпеваемого человеком в той или иной плоскости, эндолимфа соответствующего полукружного канала *4* начинает перемещаться, как это следует из изложенного в § 8, в направлении, противоположном испытываемому ускорению. Такое перемещение эндолимфы вызовет деформацию окончаний вестибулярной части слухового нерва. Возникающее при этом его раздражение будет передано в мозг человека и воспринято им

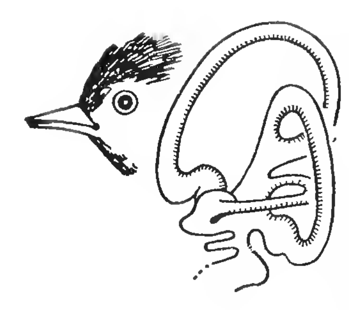


Рис. 60. Вестибулярный аппарат птиц.

как сигнал, информирующий о сообщении телу ускорения в той или иной плоскости.

Высокая чувствительность вестибулярного аппарата вызывает у некоторых даже совершенно здоровых людей появление болезненного состояния при морской качке, колебаниях самолета и вибрации автомобиля [138]. Вот почему при выяснении пригодности отдельных лиц к работе в морском флоте, авиации и космонавтике приходится проверять реакцию каждого испытуемого на переносимые им ускорения.

Вестибулярным аппаратом обладают многие живые организмы. Даже у простейших из них существуют органы равновесия [86]. Весьма высока их чувствительность у птиц, которые, как предполагают ученые, пользуются этими органами для ориентации во время перелетов [124]. Дело в том, что даже при незначительных отклонениях направления полета от плоскости меридиана в каждом из полукружных каналов вестибулярного аппарата птицы (рис. 60) возникают изменения давления эндолимфы.

При горизонтальном полете в плоскости меридиана NOZ (рис. 61) в направлении как на север N, так и на юг S птица вследствие вращения плоскости меридиана вокруг вертикали OZ с угловой скоростью $\Omega_{м}$ будет вынуждена преодолевать поворотное ускорение $w_{п.м}$. Его вектор, согласно изложенному в § 9, будет горизонтален и направлен в северном полушарии влево по ходу полета. В силу этого обстоятельства в горизонтальном полукружном канале вестибулярного аппарата птицы (рис. 60) возникнет давление $F_{м}$ (рис. 61), направленное вправо. Если же полет будет происходить в направлении на запад W или на

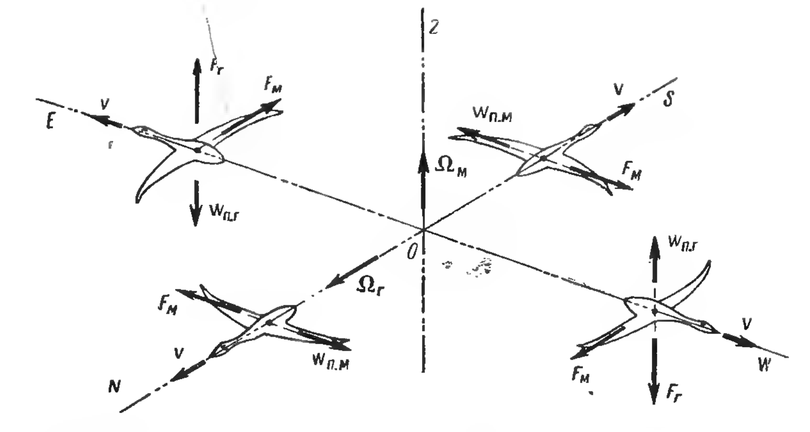


Рис. 61. Использование птицами гироскопического эффекта для ориентирования.

восток E, то птице придется преодолевать дополнительно еще и поворотное ускорение $w_{п.г}$, порождаемое вращением плоскости горизонта NOW вокруг полуденной линии ON с угловой скоростью $\Omega_г$ (см. рис. 52).

При полете на запад W (рис. 61) вектор поворотного ускорения $w_{п.г}$ будет направлен вертикально вверх, а при движении на восток E — вниз. Поэтому в вертикальных полукружных каналах возникнет давление $F_г$, направленное в первом случае вниз, а во втором — вверх. По величине и направлению этого дополнительного давления $F_г$ птица и может ориентироваться относительно частей света. Нетрудно заметить, что увеличение давления $F_г$, направленного вертикально вверх, будет сигнализировать об отклонении полета от плоскости меридиана к востоку E при движении на север N и к западу W при полете на юг S. Соответственно изменение давления $F_г$, направленного вертикально вниз, будет сигнализировать об отклонении направления движения на запад W при полете на север N и

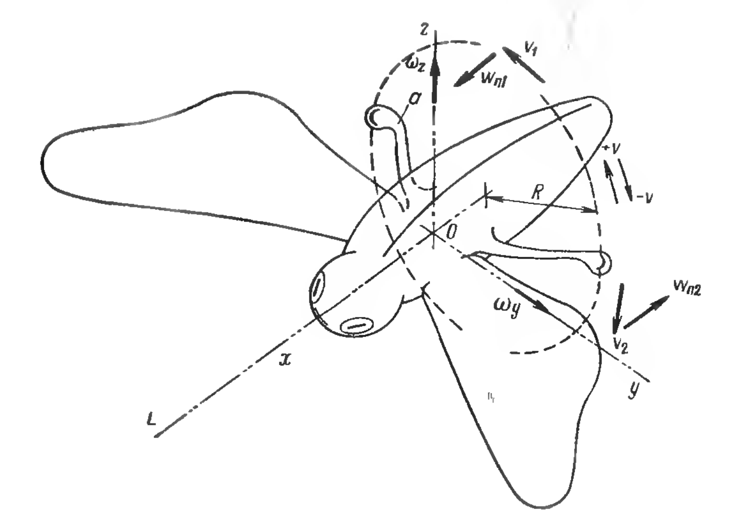


Рис. 62. Гироскопический эффект жужжалец насекомого.

на восток E — при движении на юг S. Чем больше величина $F_г$, тем больше угол, составляемый направлением полета с плоскостью меридиана NOZ.

Весьма интересное проявление гироскопического эффекта наблюдается у двукрылых насекомых, обладающих жужжальцами a (рис. 62), непрерывно вибрирующими в полете. Поворачиваясь вокруг продольной оси Ox насекомого, такие жужжальца приводят свои утолщенные кончики в возвратно-поступательное движение по окружности радиусом R. Указанные колебания утолщенных кончиков жужжалец происходят в плоскости yOz с переменной реверсируемой скоростью $\pm v$.

Если в силу каких-либо обстоятельств насекомое, поворачиваясь вокруг осей Oy или Oz, начнет отклоняться от выбранного направления полета OL, с которым первоначально была совмещена его продольная ось Ox, то такой

маневр сразу же повлияет на характер движения жужжалец. Действительно, при вращении насекомого вокруг осей Oy или Oz соответственно с угловыми скоростями ω_y или ω_z массы утолщенных кончиков его жужжалец будут поставлены в условия движения с поворотным ускорением. Последнее обстоятельство обусловит отклонение утолщенных кончиков жужжалец от плоскости yOz, порождающее их деформацию. Эти деформации жужжалец и воспринимаются насекомым как сигналы, информирующие об изменении направления полета [74, 77].

При приближении жужжалец к плоскости xOz их окружная скорость v_1 будет почти полностью проектироваться на ось Oy, поэтому, согласно изложенному в § 9 (см. рис. 20), возникновение поворотного ускорения $w_{п1}$ жужжалец будет порождаться в основном угловой скоростью ω_z поворота насекомого вокруг оси Oz.

При приближении жужжалец к плоскости xOy их окружная скорость v_2 будет давать бо́льшую проекцию на ось Oz, в связи с чем поворотное ускорение $w_{п2}$ жужжалец будет обусловливаться главным образом уже угловой скоростью ω_y.

Таким образом, величина и направление деформации жужжалец и информирует насекомого об угловых скоростях ω_y и ω_z совершаемых им разворотов, позволяя тем самым выполнять не только прямолинейный полет, но и необходимое маневрирование. Как видим, жужжальца мух, комаров и других подобных им насекомых выполняют весьма важную функцию при их ориентировании в пространстве [73, 99]. Опыты показывают, что при удалении жужжалец мухи лишаются способности управлять своим телом в полете и поэтому неизбежно падают.

Как было показано выше (§ 11), главная ось вращающегося гироскопа стремится сохранить свое направление стабильным в пространстве. При отсутствии воздействия на гироскоп моментов внешних сил остается неизменным и значение его кинетического момента, равное произведе-

нию момента инерции ротора на угловую скорость его вращения. Указанный закон, остающийся справедливым для любых вращающихся тел, своеобразно используется некоторыми животными при свободном падении.

Широко известен тот факт, что кошка, падающая с высоты спиной вниз, переворачивается в воздухе и приземляется на лапы [86, 93, 106]. Очевидно, для выполнения такого переворота кошке в процессе падения необходимо какое-то время вращаться. Но ведь с самого начала ей не сообщалось вращения и, следовательно, ее кинетический момент все время должен оставаться равным нулю. Как же ухитряется кошка придать себе угловую скорость вращения, не обладая кинетическим моментом?

Ответ на этот вопрос был найден учеными с помощью скоростной киносъемки. Полученные кинокадры [109], часть из которых приведена на рис. 63, позволили подробно проследить за процессом переворачивания животного. Результаты исследований [67, 75, 98] показали, что кошка, как только осознает свое падение (рис. 63, *а*), сразу же отставляет хвост и задние лапы как можно больше в стороны, а передние, наоборот, поджимает к туловищу (рис. 63, *б*). В это же мгновение, скручивая свое тело, кошка начинает поворачивать голову и переднюю часть туловища вокруг своей продольной оси. Этот поворот передней части туловища в сторону читателя, ясно виден на первых кинокадрах.

Но, как уже говорилось выше, кинетический момент животного относительно его продольной оси остается равным нулю. Поэтому как только начнется вращение передней части туловища кошки, сразу же возникнет противоположное вращение его задней части. При этом кинетические моменты обеих вращающихся половин тела будут равны по величине и противоположны по направлению.

Поскольку массы задних лап и хвоста на рассматриваемом этапе движения далеко отодвинуты от оси вращения, а передние лапы к ней приближены, то момент инерции

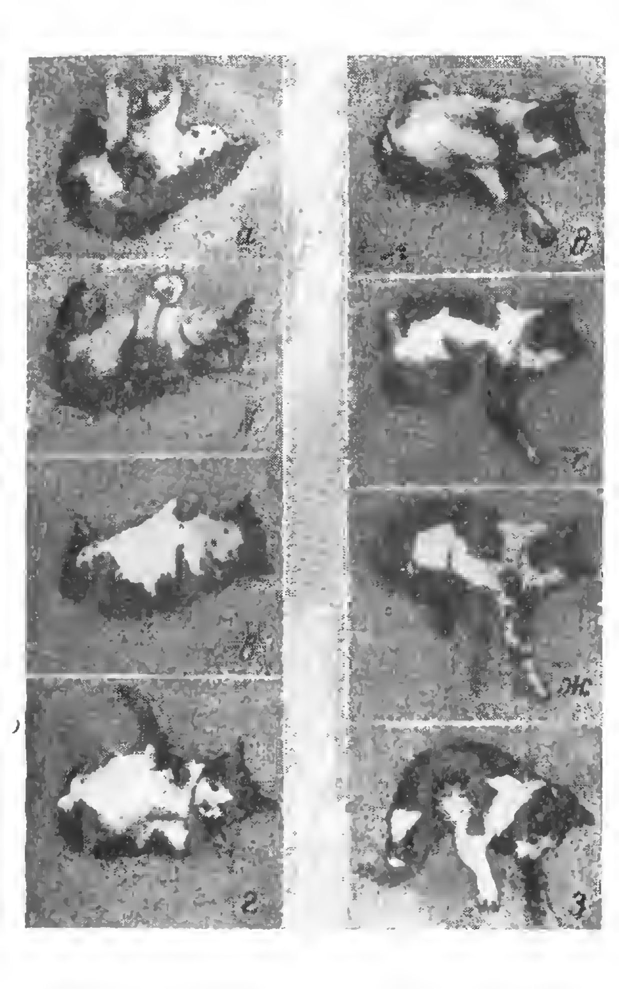


Рис. 63. Кинокадры поведения падающей кошки.

задней половины туловища относительно этой оси, согласно изложенному в § 10, будет значительно больше соответствующего момента инерции передней половины туловища. В силу указанного обстоятельства угловая скорость вращения передней части животного будет больше скорости вращения его задней части. В результате за одно и то же время передняя половина тела кошки повернется в направлении к читателю на больший угол, чем задняя половина в противоположном направлении (рис. 63, *в*).

Затем начинается второй этап движения. Кошка теперь вытягивает передние лапы и поджимает задние (рис. 63, *г*). Одновременно она начинает закручивать свое тело в обратном направлении, поворачивая переднюю часть туловища вокруг своей продольной оси теперь уже в направлении от читателя. Так как суммарный кинетический момент животного остается и во втором этапе равным нулю, то задняя половина тела кошки сразу же начнет поворачиваться в направлении к читателю.

Кошка в начале второго этапа движения изменила моменты инерции обеих половин своего тела. Момент инерции ее передней части стал теперь меньше, чем задней. Поэтому в процессе второго этапа задняя половина туловища кошки поворачивается к читателю с большей угловой скоростью, чем ее передняя половина, вращающаяся в обратном направлении.

В результате за время второго этапа передняя часть туловища повернется вокруг продольной оси животного на меньший угол, чем его задняя половина. Когда в конце второго этапа кошка опять вытянет задние лапы и подожмет передние (рис. 63, *д*), ее положение будет таким же, как и в начале первого этапа рассматриваемого движения (рис. 63, *б*), только вся она окажется повернутой на заметный угол вокруг своей продольной оси. Быстро повторяя описанный цикл движений (рис. 63, *е*), кошка правильно ориентирует себя в пространстве (рис. 63, *ж*) и приземляется на все четыре лапы (рис. 63, *з*).

IV

ГИРОСКОП В МОРСКОМ ФЛОТЕ

16

Необходимость применения гирокомпаса в мореплавании

Строгое выдерживание в процессе плавания корабля заранее намеченного маршрута, пролегающего, например, между пунктами A, B и C (рис. 64), возможно лишь при условии непрерывного учета изменений географических координат судна. Предположим, что местоположение корабля было определено в точке A. Тогда дальнейшее выдерживание заданного пути AB окажется возможным только в том случае, если в течение всего времени плавания будут известны скорость v движения корабля и угол K, составляемый направлением движения с плоскостью меридиана и называемый обычно курсом судна. Зная скорость v и курс K движения корабля, можно вычислить время, в течение которого судно достигнет пункта B.

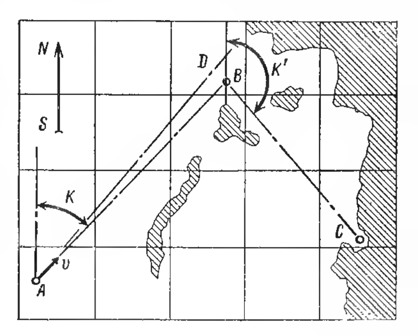


Рис. 64. Путь корабля, нанесенный на карту.

Чем точнее приборы, определяющие угол курса, время и скорость движения

корабля, тем с большей уверенностью можно полагать, что если придать кораблю в вычисленный момент времени движение с новым курсом K', то плавание будет завершено точно в пункте C заданного маршрута.

Особо важное значение для мореплавания имеют приборы, измеряющие курс K. Если ошибиться в его измерении хотя бы на доли градуса, то корабль будет двигаться уже не по заданному направлению AB, а по некоторой отклоненной прямой AD, в силу чего при плавании на большие расстояния судно может пройти от намеченного пункта B на значительном удалении. Необходимое изменение курса будет осуществлено в этом случае уже не в заданной точке B, а в некоторой другой точке D. Поэтому вывод корабля в пункт C в условиях плохой видимости будет затруднен.

Вот почему человеческая мысль с древнейших времен работала над созданием такого прибора, который позволял бы с необходимой точностью определять величину угла курса корабля при движении его в открытом море в любую погоду. Еще в глубокой древности люди применили для этой цели магнитную стрелку, которая на протяжении многих столетий удовлетворяла запросам мореплавателей. Но с увеличением грузоподъемности кораблей, когда их корпуса начали изготовлять стальными, точность работы магнитного компаса резко снизилась.

Железные массы корабля, мощные генераторы, вырабатывающие электрическую энергию, и исполнительные двигатели, потребляющие большие ее количества,— все это вызывало отклонения магнитной стрелки от меридиана. По указанным причинам магнитный компас и не мог удовлетворить нуждам развивающегося кораблестроения. Последнее обстоятельство заставило усиленно искать новых путей создания такого компаса, на показания которого не влияли бы ни железные массы корабля, ни применяемый на нем электрический ток, ни другие подобные им возмущения.

17

Гироскопический компас Фуко

Производя опыты с гироскопом, Л. Фуко обнаружил, что при принудительном удерживании его главной оси в плоскости горизонта ось ротора приходит к совмещению с плоскостью географического меридиана. Замеченное свойство позволило создать **гироскопический компас**, на поведение которого не могут оказывать влияния указанные выше возмущающие факторы.

Для уяснения физической сущности такого прибора представим себе, что у гироскопа (см. рис. 9) ликвидирована свобода вращения вокруг внутренней оси BB его подвеса. Гироскоп в этом случае примет вид, показанный на рис. 24, и будет иметь только две степени свободы вращения: вокруг осей AA и CC. Если такой гироскоп установить, например, в пункте L на экваторе (рис. 65) так, чтобы его наружная ось CC была вертикальна, то главная ось гироскопа AA будет неизменно оставаться горизонтальной.



Пусть в начальный момент времени ось AA горизонтальна и направлена с запада на восток. Такое расположение гироскопа не останется неизменным. Участвуя в суточном вращении

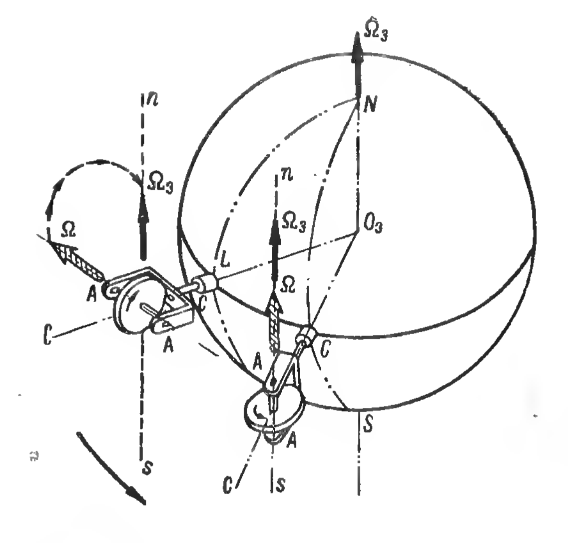


Рис. 65. Принцип работы гирокомпаса Фуко.

Земли, он будет поставлен в условия одновременного вращения вокруг осей *AA* и *ns*, из которых последняя параллельна земной оси *NS*. В рассматриваемом случае, если не принимать во внимание сил трения в опорах, свобода вращения гироскопа вокруг оси *CC* ничем не ограничена. Поэтому стремление массы ротора сохранить направление своего движения неизменным в пространстве вызовет поворот гироскопа вокруг оси *CC*.

С первого же мгновения гироскоп, установленный в пункте *L*, будет участвовать в суточном вращении Земли, поворачиваясь вместе с ней вокруг земной оси *NS* с угловой скоростью Ω_3. Поскольку свобода вращения вокруг внутренней оси подвеса ликвидирована, то гироскоп будет вынужден поворачиваться вокруг полуденной линии *ns* с угловой скоростью Ω_3 суточного вращения Земли. Однако масса ротора будет сопротивляться указанному вынужденному повороту, сопровождающемуся поворотным

ускорением. В результате у гироскопа появится движение вокруг оси CC, в процессе которого вектор угловой скорости Ω собственного вращения будет идти к совмещению с вектором угловой скорости $\Omega_з$ вынужденного поворота.

Описанное движение гироскопа будет происходить до тех пор, пока его главная ось AA, с которой совмещен вектор угловой скорости Ω, не совместится с осью ns, параллельной вектору скорости $\Omega_з$. Как видим, гироскоп, главная ось которого принудительно удерживается в горизонте, вследствие суточного вращения Земли приходит к совмещению с плоскостью географического меридиана и таким образом превращается в гироскопический компас.

В общем случае, при расположении гироскопа с двумя степенями свободы на земной поверхности под любой географической широтой, его главная ось будет совмещаться с проекцией вектора скорости $\Omega_з$ на плоскость горизонта. А поскольку эта проекция всегда лежит в плоскости меридиана, то гирокомпас Фуко будет неизменно совмещаться с ней. Исключением являются лишь районы географических полюсов Земли, где горизонтальная проекция угловой скорости равна нулю (см. рис. 50).

Совмещение гирокомпаса Фуко с плоскостью меридиана можно продемонстрировать на специальном стенде (см. рис. 55). Лишите смонтированный на глобусе гироскоп свободы вращения вокруг внутренней оси и совместите его наружную ось с радиусом глобуса. Сообщите теперь ротору собственное вращение и начните поворачивать глобус вокруг его оси вращения. Вы увидите, как главная ось гироскопа сразу же придет к совмещению с меридиональной плоскостью глобуса.

И все же, несмотря на то, что гирокомпас Фуко совмещает свою ось с плоскостью меридиана, он не мог быть использован для целей судовождения. Дело в том, что при

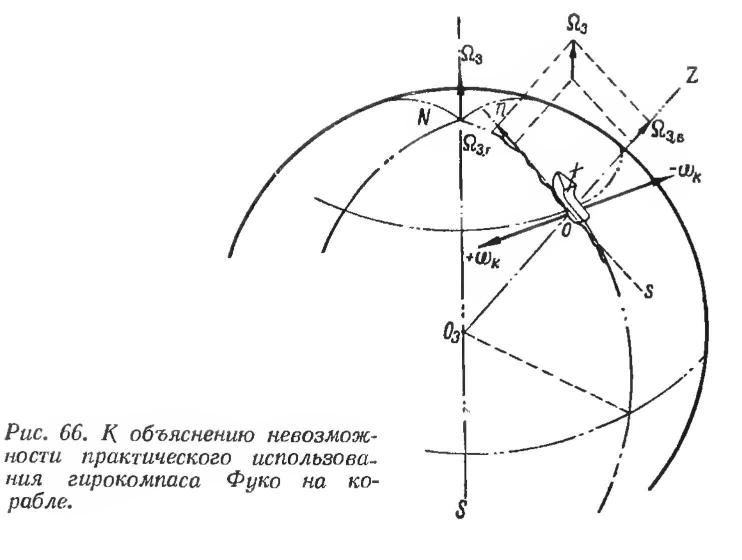


Рис. 66. К объяснению невозможности практического использования гирокомпаса Фуко на корабле.

установке корпуса прибора неподвижно на земной поверхности основной причиной вынужденного поворота гироскопа являлось только суточное вращение Земли. Но представьте гирокомпас Фуко смонтированным на палубе корабля, которая, как правило, не сохраняет горизонтального положения. Перемещаясь по поверхности моря, корабль при волнении то зарывается носовой частью в волны, в связи с чем его корпус поворачивается вокруг своей поперечной оси с угловой скоростью $+\omega_к$ (рис. 66), то подымается на гребень волны, поворачиваясь в противоположном направлении с угловой скоростью $-\omega_к$.

Таким образом, вынужденный поворот гироскопа будет определяться теперь не только суточным вращением Земли, но и колебаниями судна. Главная ось гироскопа теперь совмещается уже не с плоскостью географического меридиана nOZ, в которой находится вектор горизонтальной составляющей $\Omega_{з.г}$ угловой скорости $\Omega_з$ суточного враще-

ния Земли, а с направлением суммарного вектора обеих угловых скоростей $\Omega_{з. г}$ и $\omega_к$.

Угловая скорость $\omega_к$ колебаний корабля по своей величине во много раз превосходит скорость $\Omega_{з. г}$. В самом деле, вращение Земли происходит со скоростью 360° за 24 часа, в то время как скорость колебаний корабля достигает 10° в секунду. Как видим, $\omega_к$ более чем в 2000 раз превышает по величине скорость $\Omega_з$. Поэтому главная ось гирокомпаса практически приходит к совмещению не с вектором $\Omega_{з. г}$, а с вектором $\omega_к$ угловой скорости колебаний корабля.

Однако самое неприятное заключается в том, что из-за колебаний судна вектор угловой скорости $\omega_к$ непрерывно меняет свое положение относительно плоскости географического меридиана. За время одного периода колебаний, равного примерно 7—10 *сек*, вектор $\omega_к$ будет дважды поворачиваться вокруг вертикали $O_зZ$ на угол около 180°. За указанными поворотами вектора $\omega_к$ будет непрерывно следовать ось гирокомпаса; она уже не сможет оставаться в плоскости меридиана, а будет совершать относительно нее колебания, отклоняясь в обе стороны на угол, равный около 90°.

Естественно, что по указанным причинам практическое использование гирокомпаса Фуко для определения на корабле плоскости географического меридиана оказалось невозможным. Потребовалось несколько десятилетий напряженной исследовательской и экспериментальной работы, прежде чем был создан мореходный гироскопический компас, нормально работающий при волнении на море. Однако и гирокомпас Фуко нашел себе практическое применение во всех тех случаях, когда определение положения плоскости географического меридиана можно производить при неподвижном относительно земной поверхности корпусе прибора, например при геодезических и маркшейдерских работах.

18

Практическая модель гироскопического компаса

В результате многолетней работы ученых и техников была найдена возможность создания гироскопического компаса, мало реагирующего на колебания корабля. В основу практически работоспособной модели прибора был положен гироскоп с тремя степенями свободы. К его внутреннему кольцу *ВК* (рис. 67) подвешивался груз *Q* весом *G*, удерживающий главную ось *АА* гироскопа в плоскости горизонта. Тем самым центр тяжести гироскопа смещался относительно внутренней оси *ВВ* на расстояние *l*. В остальном элементы гирокомпаса оставались принципиально такими же, как и у обычного гироскопа с тремя степенями свободы (см. рис. 9).

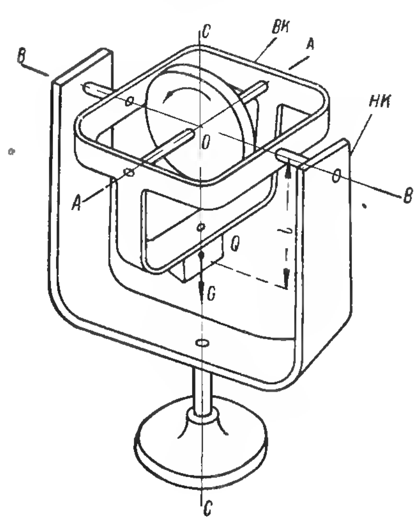


Рис. 67. Модель гирокомпаса с маятником,

К моменту создания удовлетворительно работающей модели гирокомпаса его внутреннее кольцо *ВК* стали выполнять в виде камеры (рис. 68), закрывающей снаружи ротор. Такая гирокамера *ВК* представляет собой обод с закрепленными на нем по оси *ВВ* цапфами для монтажа подшипников, сочленяющих ее с наружным кардановым кольцом *НК*. С обеих торцовых поверхностей обода гирокамеры *ВК* монтируются тарельчатые крышки, несу-

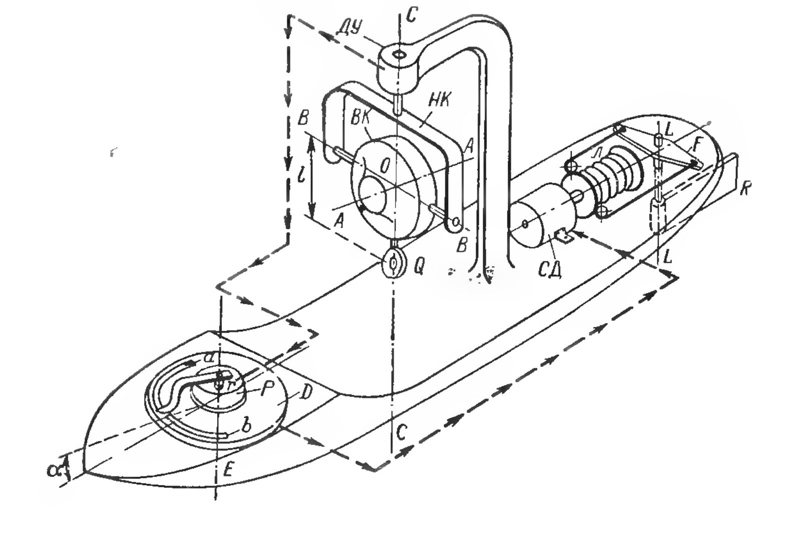


Рис. 68. Установка гирокомпаса на корабле.

щие подшипники, обеспечивающие свободу вращения ротора вокруг главной оси гироскопа. При этом наружное кольцо *НК* в некоторых моделях выполняют в виде полукольца, обеспечивая тем самым бо́льшую компактность прибора.

Независимо от конструктивного выполнения внутреннего карданова кольца *ВК* рассмотренный гироскопический компас обладает тремя степенями свободы соответственно вокруг осей *АА*, *ВВ* и *СС*, причем свобода вращения вокруг оси *ВВ* ограничена грузом *Q*, создающим, как уже говорилось выше, маятниковость относительно оси *ВВ*.

Если такой прибор, получивший название **гироскопического компаса с маятником**, установить в каком-либо пункте земной поверхности, то через некоторое время его главная ось совместится с плоскостью

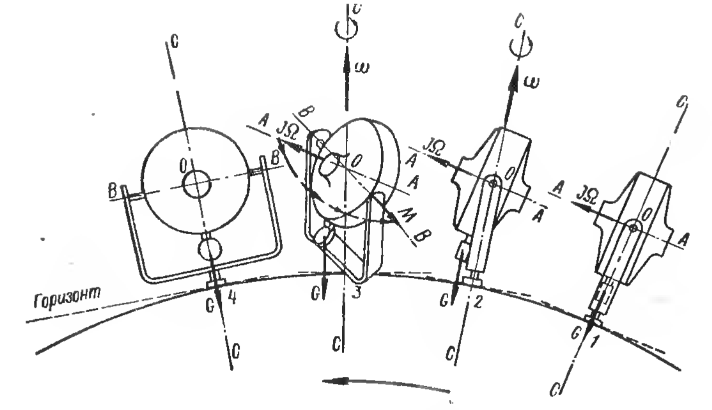


Рис. 69. Принцип работы гирокомпаса с маятником.

географического меридиана. В самом деле, представим себе рассматриваемый гирокомпас установленным на земной поверхности в каком-либо пункте *1* (рис. 69) таким образом, чтобы в начальный момент времени его главная ось *АА* была горизонтальна и направлена с запада на восток. При таком положении прибора маятник не сможет создавать действующих на гироскоп моментов, так как направление силы *G* его веса проходит через точку подвеса *О*.

Рассмотренное расположение гирокомпаса не будет оставаться неизменным. С течением времени вследствие суточного вращения Земли место установки будет перемещаться в пространстве. Это перемещение, если за вращением Земли наблюдать из мирового пространства со стороны ее Северного полюса, будет казаться совершающимся против часовой стрелки. По прошествии некоторого времени место установки гирокомпаса займет в пространстве новое положение, обозначенное на схеме точкой *2*.

В процессе этого перемещения гироскоп, стремясь сохранить направление своей главной оси *АА* неизменным

в пространстве, начнет приобретать наклон к плоскости горизонта. Восточный конец оси *AA* будет подыматься над плоскостью горизонта, а западный соответственно опускаться. Указанный видимый уход гироскопа вызовет отклонение соединенного с гирокамерой маятника. Направление силы *G* веса маятника теперь уже не будет совмещено с осью *CC* наружного карданова кольца и, следовательно, не будет проходить через точку *O* подвеса гироскопа. При этом условии сила *G* создает внешний момент, действующий на гироскоп относительно его внутренней оси *BB*.

Для наблюдающего из мирового пространства созданный силой *G* момент будет казаться направленным против часовой стрелки. Следовательно, в соответствии с правилами построения векторов (см. § 8) вектор *M* рассматриваемого момента будет совмещен с осью *BB* и направлен в ее северную сторону, как и показано на схеме в положении *3*.

Как только на гироскоп начнет действовать момент *M* внешней силы, сразу же возникнет прецессионное движение и его главная ось *AA*, по которой направлен вектор кинетического момента $I\Omega$, пойдет к совмещению с вектором момента *M*. Так как последний направлен по внутренней оси *BB*, то прецессия гироскопа будет происходить вокруг наружной оси *CC* с угловой скоростью ω, определяемой по формуле (7). Описанное движение гирокомпаса будет происходить до тех пор, пока его главная ось *AA* не совместится с плоскостью географического меридиана, как это показано на схеме в положении *4*. Таков в самых общих чертах принцип работы гироскопического компаса с маятником.

Для обеспечения прихода гироскопа в плоскость меридиана можно вместо маятникового груза воспользоваться двумя сообщающимися сосудами, устанавливаемыми на гирокамере (рис. 70) симметрично внутренней оси подвеса. После соединения сосудов сообщающей трубкой их

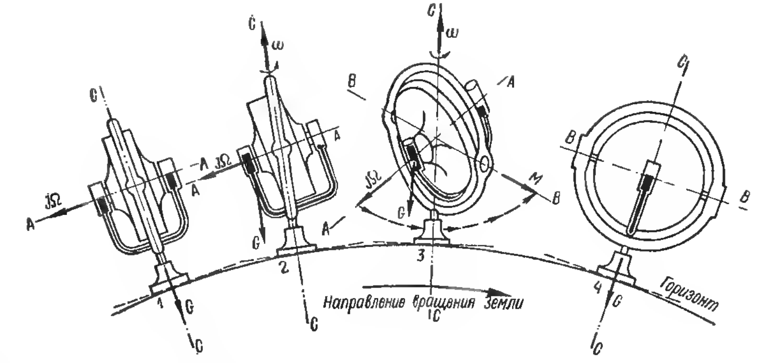


Рис. 70. Принцип работы гирокомпаса с ртутными сосудами.

внутренность заполняется ртутью, что смещает центр тяжести гироскопа относительно точки его подвеса.

Установим рассматриваемый гироскопический прибор в пункте *1* земной поверхности таким образом, чтобы его ось *AA* в начальный момент времени была горизонтальна и направлена с запада на восток. В этом положении ртуть заполняет оба сосуда равномерно, благодаря чему сила *G* ее веса будет проходить через точку подвеса гироскопа, не вызывая действующих на него моментов. Но, так же как и в прошлом примере, такое положение гироскопа относительно земной поверхности не останется неизменным. Вследствие суточного вращения Земли его ось *AA* начнет принимать все растущий наклон к плоскости горизонта.

Чтобы уяснить сущность работы прибора, проследим за изменениями его положения с течением времени. С этой целью вновь представим себя в роли наблюдателя, следящего из мирового пространства за движениями Земли и установленного на ее поверхности гироскопа. Условимся вести наблюдение со стороны Южного географического полюса, когда суточное вращение Земли кажется нам происходящим по часовой стрелке.

Перемещаясь вместе с земным шаром, пункт установки гироскопа по прошествии некоторого времени займет в мировом пространстве новое положение *2*. Его главная ось *AA* теперь уже не будет параллельной плоскости горизонта. Оставаясь неизменной в мировом пространстве, она своим восточным концом подымется над горизонтом. Вместе с гирокамерой получат наклон и сообщающиеся сосуды. Ртуть, заполняющая их, сохраняя свой уровень горизонтальным, перетечет из восточного сосуда в западный или, если смотреть со стороны наблюдателя,— из правого сосуда в левый.

Избыток ртути в западном сосуде создает внешний момент, действующий на гироскоп относительно его внутренней оси *BB*. С течением времени ось *AA* будет принимать все больший наклон к горизонту, как это показано в положении *3*, в связи с чем избыток ртути в западном сосуде будет увеличиваться. Под воздействием все увеличивающегося момента *M*, порождаемого избытком ртути в западном сосуде, возникнет прецессионное движение гироскопа вокруг наружной оси *CC* с угловой скоростью ω. В результате этого движения через некоторое время главная ось *AA* гироскопа совместится с плоскостью географического меридиана, как это показано на схеме в положении *4*. Таков принцип работы гирокомпаса с ртутными сосудами.

Сравнивая между собой обе схемы гирокомпасов, убеждаемся в общности принципа их работы. Заметим только, что у гирокомпаса с маятником вектор его кинетического момента $J\Omega$ при совмещении оси *AA* с плоскостью меридиана направлен в сторону Северного полюса, а у гирокомпаса с ртутными сосудами — в сторону Южного.

Необходимо иметь в виду, что в действительности конструкция гирокомпаса значительно сложнее рассмотренных схем. В настоящее время гирокомпас представляет собой довольно сложный прибор, которым можно пользоваться не только для навигационных целей, но и для автоматического выдерживания корабля на заданном курсе,

для записи пройденного пути, для стабилизации судовых прожекторов в необходимом направлении и для многих других работ. Многообразие функций, выполняемых современным гирокомпасом, наряду с его высокой точностью и надежностью обеспечили ему широкое распространение в морском флоте. Одна из современных моделей гирокомпаса показана на рис. 71, где изображен момент его монтажа в наружный корпус, называемый нактоузом.

Модель мореходного гирокомпаса, надежно работающего в условиях качки корабля на волнении, была получена не сразу. Потребовалось более пяти десятилетий напряженнейшего труда ученых и производственников, для того чтобы идея Л. Фуко об использовании гироскопа для указания географического меридиана получила практическое осуществление. Долгое время техника не могла обеспечить вращение ротора гироскопа вокруг главной оси с достаточно высокой скоростью. Использование сжатого воздуха в искусственном горизонте, изобретенном еще Флерие (см. рис. 7), было связано с рядом недостатков. При низких давлениях воздуха давление в трубопроводах воздушной системы падало и ротор гирокомпаса резко снижал скорость своего вращения, ухудшая тем самым качество прибора. Кроме того, при передаче воздуха через детали опор, соединяющих кольца карданова подвеса друг с другом и

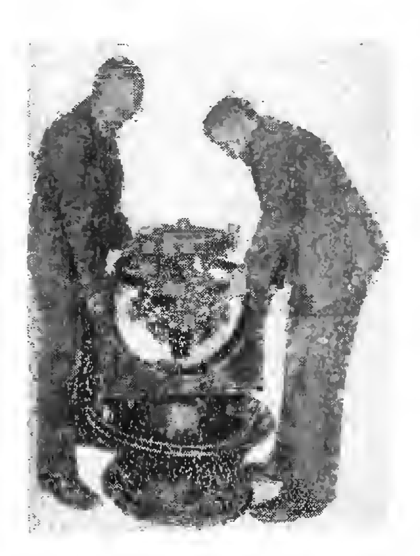


Рис. 71. Установка гирокомпаса в корпус прибора.

с корпусом прибора, происходила, несмотря на применение специальных уплотнителей, значительная утечка воздуха. Все это приводило к увеличению моментов сил трения в опорах подвеса и не обеспечивало сохранения постоянства скорости собственного вращения ротора гироскопа.



Академик Б. С. Якоби

И только после того как впервые в истории техники знаменитый русский ученый Б. С. Якоби создал в 1865 г. гироскоп с электрическим приводом [130], проблема сохранения постоянства угловой скорости вращения ротора была успешно разрешена. Однако и после этого гироскопические приборы все еще не могли выйти за рамки опытных образцов. Объясняется это тем, что гироскоп, получивший возможность вращения с постоянной, достаточной по величине угловой скоростью вокруг главной оси, все еще не имел опор подвеса, обладающих малыми моментами сил трения. Значительные же величины этих моментов пагубно сказывались на качестве прибора, так как вызывали большие угловые скорости его прецессионного движения (см. § 11), что приводило к недопустимым отклонениям главной оси от заданного направления.

Только с момента изобретения шариковых подшипников гироскопические приборы приобрели прочную техническую базу. Уже в 1905 г. лейтенант Балтийского флота М. Конокотин разработал первый механический компас, названный им «механическим компасом-гироскопом» [12]. Этот примитивный с современной точки зрения гирокомпас обладал рядом недостатков, основным из которых было

значительное влияние качки корабля на показания прибора. Однако работами М. Конокотина было положено начало практического использования гироскопа для определения на море направления географического меридиана.

Мореходная модель гироскопического компаса, надежно работающая при качке, была создана только в 1914 г. С этого момента начинается второй, более интенсивный период развития гирокомпасов. Их начинают изготовлять в Англии, Германии, США, Франции, Италии и некоторых других странах. В Советском Союзе гироскопическое приборостроение начало быстро развиваться после Великой Октябрьской социалистической революции. Развитию гирокомпасного дела во многом содействовали своими трудами акад. А. Н. Крылов и проф. Б. И. Кудревич. При их непосредственном участии в период первой пятилетки был создан советский гирокомпас «ГУ-1», успешно выдержавший испытания даже в сложных арктических условиях.

В период 1935—1937 гг. группой специалистов под руководством А. Н. Крылова был создан двухгироскопный компас, а спустя несколько лет — новый малогабаритный гирокомпас. Непрерывное совершенствование гироскопических компасов, отработка конструктивных форм и технологических методов изготовления их основных элементов создали условия, обеспечивающие оборудование всех советских кораблей отечественными гироскопическими приборами.

19

Гироскопический рулевой

Выше (§ 18) уже говорилось, что с помощью гирокомпаса могут быть автоматизированы многие процессы контроля и управления движением судна и, в частности, его удерживание на за-

данном курсе. Для работы такого автомата, называемого гироскопическим рулевым, гирокомпас снабжен специальной следящей системой, состоящей из датчика угла *ДУ* и повторителя, или так называемого репитера *P* (рис. 68). При изменении курса корабля в датчике угла возникает электрический ток, пропорциональный углу поворота судна, который передается на двигатель репитера.

Воздействие полученного сигнала вызывает поворот вала репитера вокруг оси *EE* на угол, точно равный углу поворота корабля. Таким образом, репитер синхронно повторяет все повороты гирокомпаса относительно корпуса судна*. На валу репитера *P* жестко устанавливается контактный рычаг *r*, а на диске *D* задатчика курса — две изолированные ламели *a* и *b*. При этом сам диск может поворачиваться вокруг оси *EE* относительно корпуса корабля на любой угол. Величина угла α, составляемого радиусом диска *D*, проходящим через изоляционный промежуток между ламелями *a* и *b*, с продольной осью корабля, и характеризует заданный курс.

При прямолинейном движении корабля рычаг *r* находится в изоляционном промежутке диска *D*, в связи с чем автомат рулевого управления выдерживает руль *R* судна в нейтральном положении. В случае же изменения курса гирокомпас, сохраняя ось *AA* неизменной относительно плоскости меридиана, изменит свое положение по отношению к корпусу корабля. Тем самым гирокомпас будет информировать команду о том, что новый курс корабля отличен от заданного. Одновременно на величину угла отклонения корабля от заданного курса повернется и рычаг *r* репитера *P*, замыкая при этом одну из ламелей (*a* или *b*) диска *D*.

Электрический ток, снимаемый с соответствующей ламели диска *D*, сразу же будет подан на силовой двигатель *СД*, вал которого начнет поворачиваться, приводя

* Подробнее о работе репитера см. [9, 56].

в движение лебедку *Л*. На ее барабане намотан трос, соединенный своими концами с рычагом *F* руля *R*. Поэтому при вращении лебедки *Л* руль *R* будет поворачиваться вокруг оси *LL*, создавая тем самым момент, обусловливающий разворот корабля вокруг его вертикальной оси. Схема гирорулевого выполняется таким образом, чтобы при отклонении корабля от заданного курса поворот руля *R*, или, как говорят, его перекладка, был выполнен в таком направлении, которое обеспечило бы возврат корабля к заданному курсу.

Чтобы при этом судно вновь не пересекло заданного курса, теперь уже в противоположном направлении, его руль *R* необходимо не только приводить в нейтральное положение раньше чем корабль займет первоначальное направление движения, но в некоторых случаях и перекладывать его в нужные моменты времени в обратную сторону. Если такую перекладку руля не производить, то корабль вследствие инерции его массы, выполняя поворот, будет как бы проскакивать заданное направление. Потребуется новая перекладка руля. И так до тех пор, пока судно не выровняется на заданном курсе.

Чтобы избежать колебаний корабля около заданного направления, в конструкциях гироскопических рулевых предусматривается возможность автоматического поворота диска *D* относительно корпуса судна на такой угол, направление и величина которого зависят от скорости выполняемого кораблем разворота и угла рассогласования между направлением его движения и заданным курсом. В современных конструкциях для этой же цели в силовой двигатель подается сигнал, пропорциональный угловой скорости поворота судна на курсе.

Механизм гироскопического рулевого монтируется обычно внутри колонки, устанавливаемой на капитанском мостике, и связывается синхронной передачей со штурвалом рулевого управления (рис. 72). При помощи такой передачи гирорулевой и воздействует на штурвал рулевого

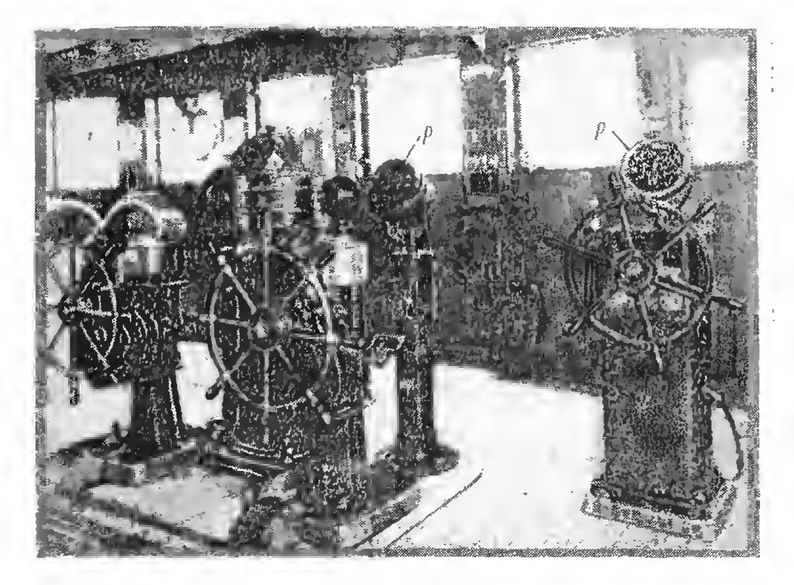


Рис. 72. Репитер гирокомпаса и гирорулевой на капитанском мостике.

управления, производя при отклонениях корабля от заданного курса необходимую перекладку руля. Непрерывное воздействие гирорулевого на рулевое управление обеспечивает автоматически, без затраты энергии человека, движение судна по заданному курсу.

20

Приборы, работающие от гирокомпаса

Гироскопический компас устанавливают обычно в специальном хорошо защищенном от вредного влияния морской воды помещении, называемом гиропостом. А между тем показания



Рис. 73. Репитер гирокомпаса на палубе корабля.

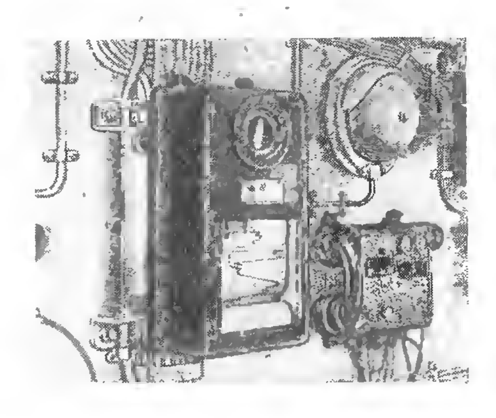


Рис. 74. Курсограф.

гирокомпаса должны быть известны на капитанском мостике, на палубе и во многих других местах корабля. Для передачи показаний гирокомпаса в эти пункты также используются репитеры, принцип действия которых был описан выше.

Репитер *P*, смонтированный на высокой подставке, может устанавливаться как на капитанском мостике (рис. 72), так и на палубе корабля (рис. 73). На вал репитера в этом случае вместо контактного рычага *r* (см. рис. 68) устанавливают круговую шкалу, разделенную на 360°. Пользуясь такой шкалой, с помощью репитера можно вести корабль по курсу и определять с палубы направление на ориентиры, расположенные вдоль берегов или находящиеся в открытом море.

Репитер гирокомпаса является основным элементом курсографа — прибора, автоматически регистрирующего изменения направления движения корабля (рис. 74). В этом приборе на валу репитера крепится силуэт корабля

и рычаг записывающего механизма, перемещающийся по подвижной бумажной ленте.

Движение бумажной ленты осуществляется от синхронного электродвигателя и происходит с постоянной скоростью. При изменении курса судна репитер поворачивает на соответствующий угол силуэт корабля и перемещает рычаг записывающего устройства перпендикулярно к продольной оси бумажной ленты. Указанные перемещения записывающего рычага в определенном масштабе пропорциональны углу курса, поэтому на движущейся ленте автоматически записываются все изменения курса корабля.

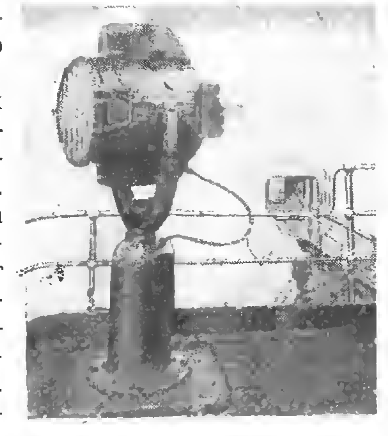


Рис. 75. Прожектор, стабилизируемый в азимуте.

Пользуясь записью курсографа, можно контролировать точность выдерживания корабля на заданном направлении и знать, в какое время и какие маневры были кораблем выполнены. Запись курсографа является своеобразным документом, по которому всегда можно восстановить пройденный кораблем путь во всех его мельчайших подробностях.

Репитеры гирокомпаса используются также и для стабилизации в заданном азимутальном направлении корабельных прожекторов. Репитер размещается внутри основания, на котором монтируется поворачивающаяся вилка, несущая прожектор (рис. 75). Так как вилка соединена с валом репитера, то при отклонении корабля от первоначального курса, репитер будет удерживать прожектор в прежнем направлении.

21

Гироскопический указатель географической широты местности

Гироскопические свойства быстро вращающихся тел принципиально могут быть использованы и для определения географической широты местности любого пункта земной поверхности. В самом деле, представим себе гироскоп с двумя степенями свободы. Его внутреннее карданово кольцо *ВК* (рис. 76), несущее ротор *Р*, монтируется непосредственно в корпусе *К* прибора. Выберем на земной поверхности пункт *L* и закрепим в нем корпус *К* описанного гироскопа так, чтобы главная ось *АА* могла перемещаться только в плоскости географического меридиана. При этом условии ротор *Р* гироскопа вынужден будет вращаться вокруг двух осей одновременно.

Его собственное вращение будет происходить вокруг оси *АА* с угловой скоростью Ω, а вынужденный поворот, вызываемый суточным вращением Земли,— вокруг оси *DD*, параллельной земной оси *NS*, с угловой скоростью $\Omega_З$. В результате такого сложного движения главная ось *АА* гироскопа в соответствии с правилом, изложенным в § 11 (см. рис. 27), весьма быстро совместится с осью *DD* вынужденного поворота, как это и показано на схеме в положении L^*.

Поскольку прямые $O_З L^*$ и *аа* и соответственно $O_З E$ и *DD* взаимно перпендикулярны, то углы ϑ и φ равны между собой. Поэтому по величине угла ϑ наклона оси *АА* к плоскости горизонта можно определять величину угла φ географической широты местности. Гироскоп превратился в указатель географической широты, называемый **гироширотом**.

Гироскопический указатель географической широты местности долгое время не мог получить практического

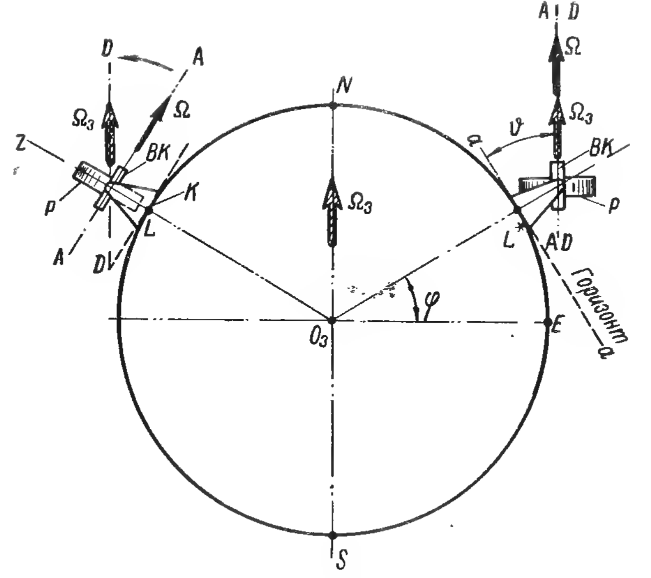


Рис. 76. Принцип работы гироширота.

осуществления из-за значительных моментов сил трения в опорах по оси его подвеса. Однако в последние годы были найдены методы использования гироскопа для определения не только широты, но и географической долготы любого пункта земной поверхности [119].

22

Гироскопические успокоители качки корабля

Гироскоп в морском флоте используется еще и в качестве успокоителя бортовой качки корабля. История изобретения такого устройства весьма интересна. В начале нашего столетия

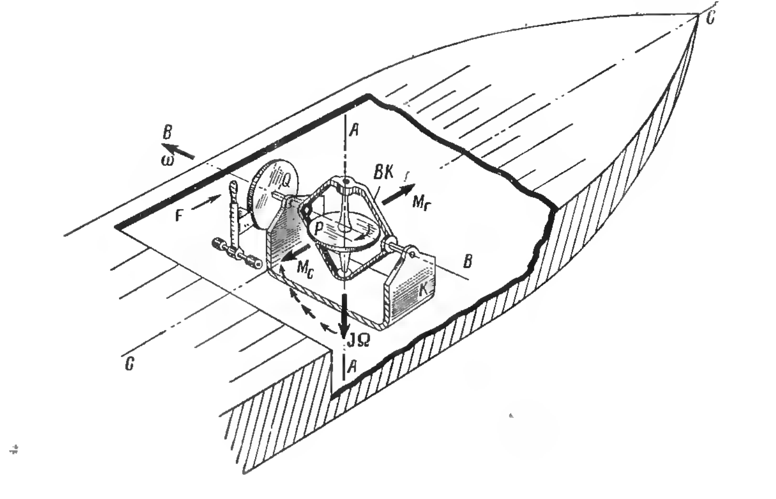


Рис. 77. Успокоитель качки корабля Шлика.

в Германии был построен пароход, предназначенный для сообщения между курортами берега Немецкого моря. В связи с тем, что это побережье мелководно, пароход был построен с малой осадкой и потому был восприимчив к качке.

Даже при незначительной волне качка парохода приводила к столь большим углам наклона, что пассажиры стали избегать поездок на нем. Чтобы исправить создавшееся положение, пароходная компания стала искать методы уменьшения качки судна на волнении. Такой метод был найден О. Шликом, предложившим для решения задачи использовать свойства гироскопа.

Предлагаемое устройство состояло из гироскопа, массивный ротор *P* которого (рис. 77) монтировался в кольце *BK* на подшипниках, обеспечивающих ему свободу вращения вокруг оси *AA*. Само кольцо *BK* монтировалось на

подшипниках в корпусе K, жестко закрепленном на судне. Тем самым кольцу BK совместно с ротором P обеспечивалась свобода вращения вокруг оси BB, расположенной перпендикулярно к продольной оси CC корабля. Вращение же гироскопа вокруг этой, третьей, оси CC было возможно только совместо с корпусом корабля.

В системе гироскопического успокоителя предусматривался тормоз, шкив Q которого соединялся с кольцом BK. Тормозное устройство позволяло, воздействуя на шкив Q усилием F, притормаживать движение гироскопа при его вращении вокруг оси BB. В тех случаях, когда судно должно было совершать переходы по морю в бурную погоду, ротор P приводился во вращение вокруг оси AA с максимально возможной угловой скоростью Ω. Развивая при этом кинетический момент $J\Omega$, гироскоп приобретал способность оказывать сопротивление действующим на него внешним возмущающим моментам. Именно этот эффект и был использован в успокоителе качки корабля.

При подходе волны, стремящейся наклонить судно на борт, на его корпус действует момент возмущающей силы, который передается и гироскопу. Представим себе, что волна подходит с правого борта, стремясь наклонить корпус на левый борт. Энергия волны в этом случае будет стремиться повернуть корабль вокруг его продольной оси в направлении против часовой стрелки, если смотреть со стороны кормы. Описанное проявление энергии волн можно представить в виде внешнего возмущающего момента M_C, действующего на гироскоп относительно оси CC. Под влиянием этого момента возникнет прецессионное движение гироскопа вокруг оси BB с угловой скоростью ω, равной, согласно формуле (7), величине $M_C/J\Omega$. Но как только гироскоп, вращающийся вокруг оси AA с угловой скоростью Ω, получит дополнительное вращение вокруг оси BB, сразу же возникнет гироскопический момент $M_г$, равный $J\Omega\omega$ и направленный противоположно внешнему возмущающему моменту M_C.

Воздействуя через опоры, расположенные по оси BB, непосредственно на корпус корабля, гироскопический момент уравновесит внешний момент, порождаемый волной. Однако в процессе описанной стабилизации главная ось гироскопа, как известно (см. рис. 27), будет идти к совмещению с осью CC, относительно которой действует возмущающий момент M_C. Чтобы не произошло совмещения осей AA и CC, при котором исчезает гироскопический момент и нарушается стабилизация корабля, и производится притормаживание движения гироскопа вокруг оси BB.

При торможении происходит превращение энергии движения гироскопа, а тем самым и энергии волн в тепло. Правда, торможение несколько уменьшает угловую скорость ω прецессии гироскопа по сравнению с величиной $M_C/J\Omega$, в связи с чем гироскопический момент $M_г$ не будет в точности компенсировать внешний возмущающий момент M_C. Но, несмотря на это, качка корабля всегда будет уменьшаться.



Академик А. Н. Крылов

Испытания показали, что при включении гироскопического успокоителя качка уменьшается обычно в 2—3 раза, причем амплитуда колебаний гироскопа вокруг оси BB не превышает при этом 30—40°. Однако гироуспокоитель Шлика из-за сложности управления его тормозным устройством не получил широкого практического применения.

Дело в том, что для каждой частоты колебаний волн приходится подбирать свою

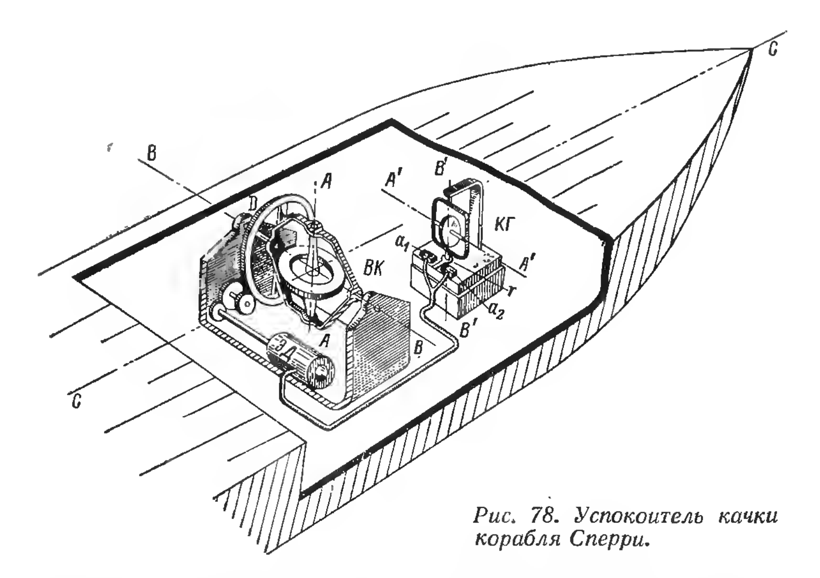


Рис. 78. Успокоитель качки корабля Сперри.

величину тормозного усилия F, которое давало бы наиболее благоприятные результаты. Поэтому настройка тормоза была эффективной только для данной частоты колебаний волн. Как только состояние волнения моря изменялось, требовалась новая регулировка тормозов. Кроме того, величина сил трения тормоза даже при одном и том же усилии F могла изменяться с течением времени вследствие попадания между трущимися поверхностями смазки, влаги и т. п. Все это вызывало необходимость дежурства техника-оператора, который должен был непрерывно подбирать величину требуемого усилия F торможения, обеспечивающую наиболее эффективную работу успокоителя в соответствии со степенью волнения на море.

В 1909 г. известный русский ученый А. Н. Крылов предложил новый более совершенный образец гироскопического успокоителя бортовой качки корабля на волнении

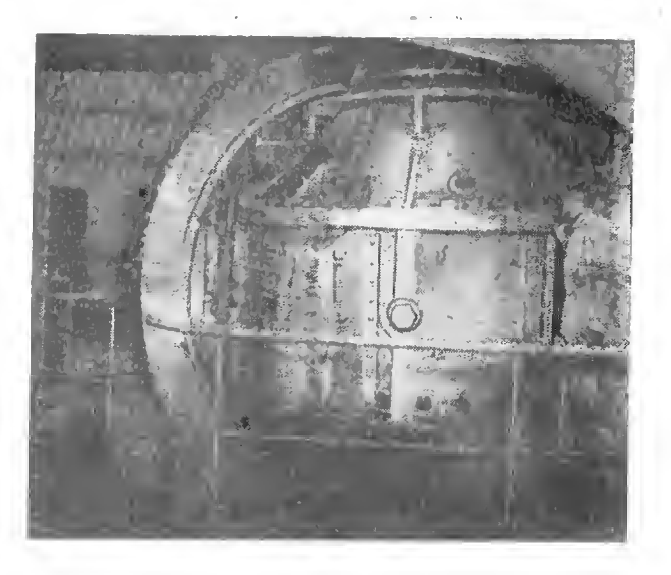


Рис. 79. Гироскопический успокоитель качки, установленный в трюме корабля.

[130]. В 1911 г. это устройство было построено американским инженером Э. Сперри. В отличие от Шлика Сперри снабдил кольцо *ВК* гироскопа (рис. 78) не тормозным шкивом, а зубчатым колесом *D*, которое через редуктор было связано с валом электрического двигателя *ЭД*.

Кроме того, в новом успокоителе применялся второй, контрольный, гироскоп *КГ* малых размеров. Он обладал двумя степенями свободы вокруг осей $A'A'$ и $B'B'$. Поэтому при воздействии на корпус судна внешнего возмущающего момента, стремящегося повернуть корабль вокруг его продольной оси *СС*, контрольный гироскоп стремился в свою очередь к совмещению своей главной оси $A'A'$ с осью *СС* корабля.

В результате такого движения контактный рычаг *r*, жестко укрепленный на кольце подвеса контрольного гироскопа, замыкал одну из контактных ламелей (a_1 или a_2), расположенных на корпусе прибора. Включением контактных ламелей подавался ток в электрический двигатель *ЭД*, который начинал вращать основной гироскоп успокоителя вокруг оси *ВВ* в таком направлении, чтобы возникающий при этом гироскопический момент уравновешивал внешний возмущающий момент.

Размеры и вес гироскопических успокоителей качки весьма значительны. В некоторых моделях (рис. 79) диаметр ротора основного гироскопа достигал 4 *м*, а вес 110 *т*. Однако по отношению к общему весу корабля вес гироскопического успокоителя качки составляет всего лишь около 1%.

23

Успокоитель качки корабля с управляющим гироскопом

Для успокоения качки корабля могут быть использованы устройства, значительно меньшие по габаритам, весу и потребляемой мощности по сравнению с рассмотренными выше гироскопическими успокоителями непосредственного действия. В таких системах для противодействия внешнему возмущающему моменту, создаваемому волной, используется не непосредственно гироскопический момент стабилизатора, а момент, создаваемый специальным механизмом, управляемым гироскопом.

В данном случае корабль снабжается по бортам специальными отсеками, из которых могут выдвигаться за пределы корпуса небольшие боковые управляемые рули (рис. 80). В тихую погоду они убираются внутрь корпуса, как это изображено на рисунке слева, и поэтому не оказы-

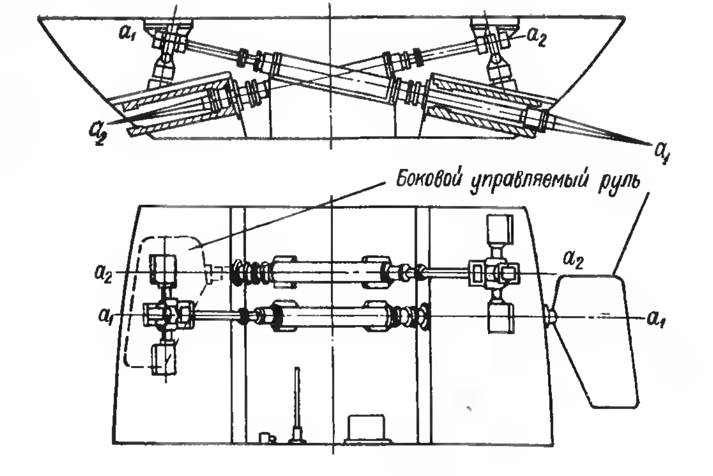


Рис. 80. Устройство боковых управляемых рулей.

вают сопротивления движению. В бурю же, при волнении на море боковые рули с помощью домкратов выдвигаются за пределы корпуса, как это изображено на схеме справа и как это видно на рис. 81.

Кроме перемещения вдоль осей a_1a_1 и a_2a_2 (рис. 80), боковые рули в выдвинутом положении могут поворачиваться вокруг этих же осей в пределах угла, равного примерно $\pm 20°$. Поскольку боковые рули расположены ниже ватерлинии, то поворотами их вокруг осей a_1a_1 и a_2a_2 при движении корабля можно создать подъемную и погружающую силы.

Если при повороте бокового руля его передняя кромка поднимается кверху, а задняя опускается вниз, возникает подъемная сила тем бóльшая, чем больше угол между плоскостью руля и горизонтом. При повороте руля в противоположном направлении будет возникать погружающая сила. Вращая управляемые рули во взаимно про-



Рис. 81. Боковой управляемый руль, выдвинутый за корпус судна.

тивоположных направлениях, можно создать со стороны одного борта судна действие подъемной силы, а со стороны другого — погружающей. Пара этих сил будет вызывать момент, действующий относительно продольной оси корабля и компенсирующий возмущающий момент, порождаемый волнами. Эффективность успокоения качки судна на волнении будет зависеть от своевременного поворота управляемых, или так называемых стабилизирующих, рулей на величину необходимого угла в нужном направлении.

Для обеспечения указанного условия используются управляющие гироскопы, один из которых аналогичен контрольному гироскопу в успокоителе качки (см. рис. 78), а второй является гировертикалью (§ 30). Размеры управляющего гироскопа невелики, что позволяет свободно разместить его на капитанском мостике (рис. 82). Являясь гироскопом с двумя степенями свободы, он, как известно (см. § 10), будет реагировать на угловую скорость поворота его основания, а в данном случае и корпуса корабля. Поэтому, как только судно под воздействием волны получит

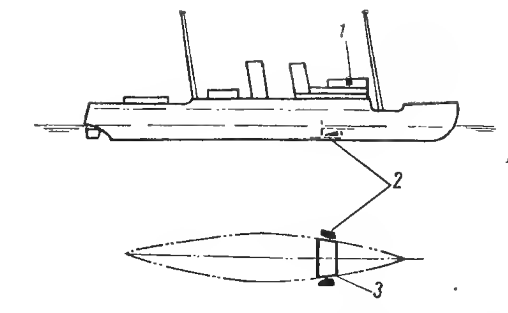


Рис. 82. Размещение стабилизирующих рулей на корабле.

1 — управляющий гироскоп; 2 — стабилизирующие рули; 3 — отсек стабилизирующих рулей.

даже самую незначительную скорость поворота вокруг своей продольной оси, управляющий гироскоп сразу же ее зафиксирует и, поворачиваясь вокруг оси подвеса, включит двигатели, вращающие стабилизирующие рули.

В результате поворота этих двигателей в требуемом направлении создается момент, противодействующий возмущающему, и наклон судна на борт приостанавливается. При изменении направления действия возмущающего момента управляющий гироскоп произведет реверсирование двигателей, благодаря чему стабилизирующие рули будут повернуты в противоположные стороны. Такое непрерывное реверсирование рулей вокруг осей a_1a_1 и a_2a_2 (рис. 80) и обеспечивает стабилизацию корабля в горизонтальном положении даже при сильном волнении моря.

Экспериментальная запись колебаний корабля (рис. 83) при включенном (участок *1*) и выключенном (*2*) стабилизаторе [67] показывает, что при работе стабилизатора качка

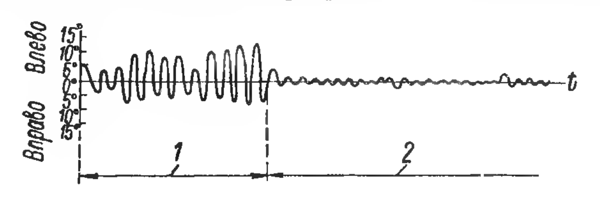


Рис. 83. График бортовой качки корабля.

судна уменьшается примерно в 4—5 раз. Характерно, что эффективность описанного успокоителя тем выше, чем больше скорость движения корабля. Вот почему аналогичные схемы гироскопических устройств применяются для стабилизации высокоскоростных судов на подводных крыльях.

24

Несколько слов о других гироприборах, используемых в морском флоте

Описанными в настоящей главе разновидностями гироскопических устройств не ограничивается использование гироскопа в морском флоте. На современных кораблях нашли применение гироскопические тахометры, гироскопические вертикали и гироскопы направления, называемые также азимутальными гироскопами.

Гироскопические вертикали используются для измерения углов наклона корпуса судна при его качке на волнении, а гироскопический тахометр и азимутальный гироскоп — при движении корабля в узких форватерах, когда даже незначительное отклонение от заданного курса может привести к нежелательным последствиям.

V

ГИРОСКОП В АВИАЦИИ

25

Роль гироскопических приборов в самолетовождении

При полете самолета необходимо иметь точные данные о географических координатах тех пунктов земной поверхности, над которыми он в данное мгновение пролетает. Только при этом условии можно совершить полет по заранее заданному маршруту. На заре авиации, когда полеты производились лишь в хорошую, так называемую летную, погоду выполнение указанных условий не вызывало затруднений.

Если самолет должен был совершить перелет по маршруту, включающему пункты *A, B, C* и *D* (рис. 84), то летчик вначале выбирал направление на поселок *A,* затем на хутор *B*, после чего вел самолет вдоль реки до моста *C* и дальше вдоль железнодорожного полотна вплоть до достижения пункта *D*. При хорошей видимости летчики легко ориентировались по местности и, используя линию естественного горизонта, выдерживали горизонтальный полет.

Но с развитием авиации, увеличением дальности, скорости и высоты полетов нельзя было рассчитывать на выполнение перелетов лишь при летной погоде. При больших дальностях беспосадочных перелетов нельзя надеяться на ясную погоду на всей трассе. На своем пути самолет

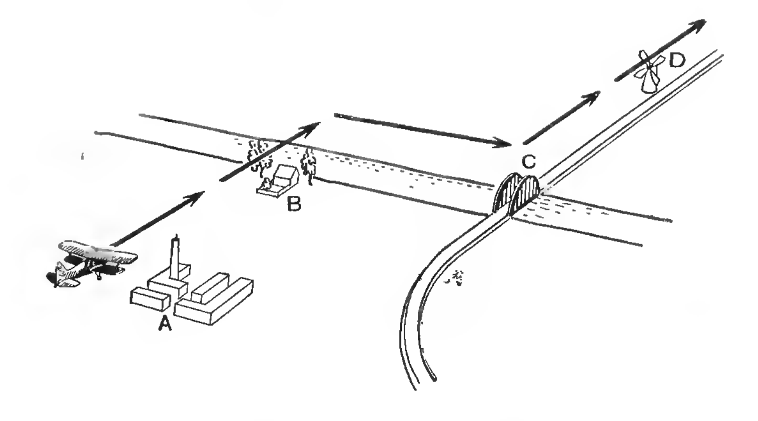


Рис. 84. Полет самолета по земным ориентирам.

может попасть в облачность, туман, дождь и другие условия, при которых земная поверхность окажется скрытой от летчика.

Выполнение полетов при отсутствии видимости земной поверхности является характерной чертой современной авиации. Самолеты, перевозящие пассажиров и почту, должны совершать регулярные рейсы в любое время дня и ночи, при любой погоде, так как в противном случае будет теряться основное преимущество воздушного сообщения — его скорость. Более того, полет сопровождается подчас отсутствием видимости и небесных светил. В таком случае летчику приходится вести машину, как говорят, «вслепую».

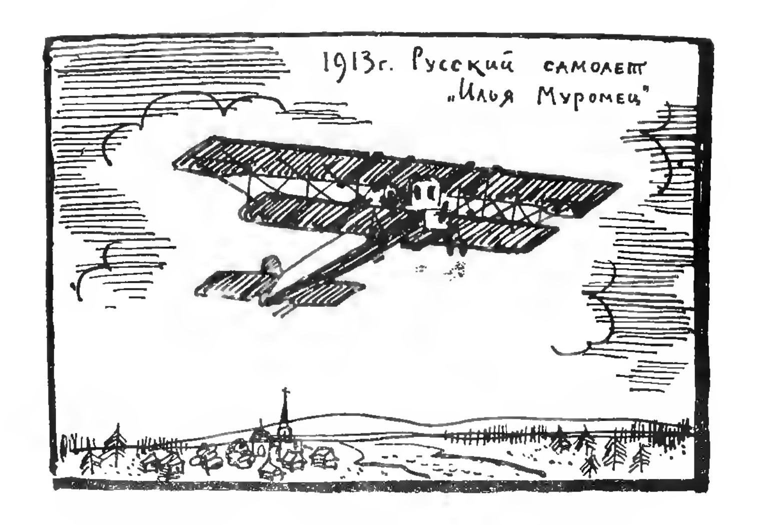
Для выполнения слепого полета по заданному маршруту самолет должен быть оборудован приборами, непрерывно указывающими направления меридиана и истинной вертикали. На первый взгляд, такие требования обеспечиваются простыми средствами. Достаточно, казалось бы, оборудовать самолет маятником и магнитной стрел-

кой, чтобы дать возможность летчику определять положение самолета относительно плоскостей горизонта и меридиана.

Именно по этому пути и пытались идти первые русские навигаторы. Так, еще в 1804 г. при полете Я. Д. Захарова с научными целями на воздушном шаре в его гондоле для определения направления движения был установлен магнитный компас [130]. Опираясь на опыт морского кораблевождения, русские авиаторы стремились оснастить свои воздушные корабли самыми совершенными в те времена навигационными приборами. При постройке своего первого в мире самолета, испытания которого происходили в России в 1882—1884 гг., А. Ф. Можайский предусмотрел установку на нем специально сконструированного магнитного компаса. Большую помощь в этом деле оказал А. Ф. Можайскому крупнейший специалист компасного дела И. П. Колонга (1839—1902).

Русский самолет «Илья Муромец», первый полет которого состоялся в декабре 1913 г., имел два комплекта маятниковых креномеров и магнитных компасов: один для летчика, второй для штурмана [76]. Опыт использования магнитного компаса на самолете «Илья Муромец» и явился началом развития самолетовождения по приборам.

Однако ни магнитная стрелка, ни маятник не могли в условиях полета, так же как и на качающемся корабле (см. § 3), сохранять свои положения неизменно совмещенными с направлениями полуденной линии и истинной вертикали. Это объясняется тем, что даже при прямолинейном полете вследствие атмосферных возмущений, случайных отклонений рулей, неравномерной тяги двигателей и других причин самолет совершает непрерывные колебания. Силы трения, существующие в опорах подвесов, воздействуя на магнитную стрелку и маятник, увлекают их за колебаниями самолета так же, как и за качкой корабля (см. § 3).



Таким образом, ни магнитная стрелка, ни маятниковый креномер не могли явиться надежными указателями плоскостей меридиана и горизонта. Возникла насущная потребность в создании принципиально новых приборов, которые бы в специфических условиях полета сохраняли неизменным свое положение относительно этих плоскостей. Было сделано много попыток улучшения и магнитного компаса, и маятникового креномера, однако ни одна из них не дала удовлетворительного результата. И только применение гироскопа позволило создать навигационные приборы, удовлетворяющие все возрастающим требованиям авиации.

Естественно, что внедрению гироскопа в авиацию во многом способствовал опыт морского флота, который к этому времени накопил достаточно материала по практическому использованию гирокомпаса на море. Но было бы ошибочным полагать, что авиация лишь позаимствовала у морского флота уже готовые гироскопические

приборы. Малые размеры кабины самолета, высокие скорости его полета, ограничения веса и габаритов механизмов, устанавливаемых на самолете,— все это исключало возможность использования на нем громоздкого морского гирокомпаса.

Правда, в начале XX в. были предприняты попытки применить гирокомпас в авиации. Дирижабль «Италия», совершивший в 1928 г. полет к Северному полюсу, был оборудован морским гирокомпасом, однако эксперимент этот прошел неудачно.

Самолетостроителям пришлось идти самостоятельным путем. Без сомнения, установившиеся методы проектирования и технологические приемы изготовления гирокомпасов были использованы самолетостроителями, что оказало решающее влияние на быстрое внедрение гироскопических приборов в авиацию. Уже в первую мировую войну русские военные самолеты были оборудованы гироскопическими указателями горизонта (рис. 85). Сжатый воздух, подаваемый внутрь прибора через патрубок *c* и отсасываемый оттуда через трубку *d*, приводил во вращение волчок, опиравшийся концом своей оси на подпятник *N* (рис. 86). Верхняя часть оси *AA* волчка оканчивалась небольшим плоским диском *a*, по положению которого относительно прозрачного сферического колпака *b*, жестко связанного с самолетом, и выдерживался горизонтальный полет.

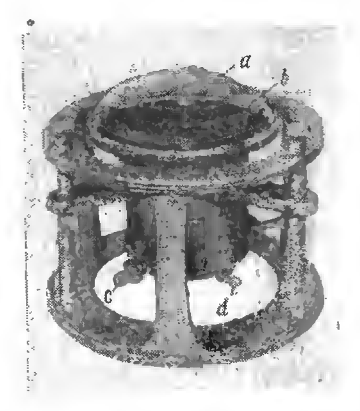


Рис. 85. Авиационный гирогоризонт 1914 г.

Центр тяжести ротора был размещен несколько ниже точки его опоры, благодаря чему ось *AA* волчка сохраняла вертикальное положение. Таким обра-

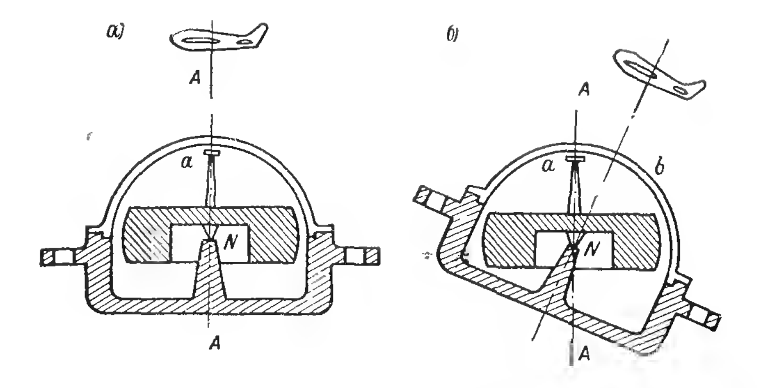


Рис. 86. Принцип устройства гирогоризонта 1914 г.: а — горизонтальный полет; б — набор высоты.

зом, при горизонтальном полете диск a волчка находился в центре колпака b. Если же самолет выходил из горизонтального положения, то вместе с ним получал наклон относительно сохраняющей вертикальное направление оси AA волчка и прозрачный колпак b. По перемещениям диска a от центра сферического колпака b, на котором были нанесены концентрические окружности (рис. 85), летчик и определял углы наклона самолета.

Русская авиация не только не отставала от зарубежных стран в деле использования гироскопических приборов на самолете, но часто являлась пионером их внедрения. Так, в 1917 г. русские летчики А. Н. Журавченко и Г. Н. Алехнович совершили на самолете «Илья Муромец» слепой полет, выдерживая заданный прямолинейный курс по гироскопическому указателю поворотов, принцип устройства которого будет описан ниже (§ 27). Этот прибор, разработанный П. П. Шиловским специально для авиации, позволил провести самолет по заданному курсу при полном отсутствии видимости земных ориентиров [40].

Работы советских ученых А. Н. Крылова, Б. В. Булгакова, С. С. Тихменева, Г. В. Коренева, А. Р. Бонина, Г. О. Фридлендера и многих других в содружестве с выдающимися советскими конструкторами и талантливыми инженерами обеспечили оснащение советской авиации высококачественными гироскопическими приборами. В двадцатых годах текущего столетия в дополнение к указателю поворотов создаются авиационные гироскопические указатели курса и горизонта, ставшие обязательными навигационными приборами современного самолета любого типа. В начале тридцатых годов советские конструкторы Д. А. Браславский, М. М. Качкачян и М. Г. Эйлькинд первыми в мире разработали, построили и испытали гиромагнитный компас, получивший широкое распространение в авиации всех стран мира.

Современные гироскопические приборы дают возможность измерять углы, угловые скорости и ускорения отклонения самолета от заданного курса. Они позволяют также определять линейные скорости и ускорения движения самолета и облегчают физический труд летчика, управляя полетом самолета автоматически и демпфируя его колебания при ручном управлении.

26

Гироскопический тахометр

Сущность устройства одного из первых авиационных гироскопических приборов, позволявшего определять повороты самолета, сводится к следующему. Быстро вращающийся вокруг оси AA ротор монтировался в кольце BK (рис. 87), которое могло поворачиваться вокруг оси BB в корпусе прибора, жестко укрепленном на основании N.

На геометрическом продолжении оси AA к кольцу BK прикреплен стержень D, заканчивающийся шаровым нако-

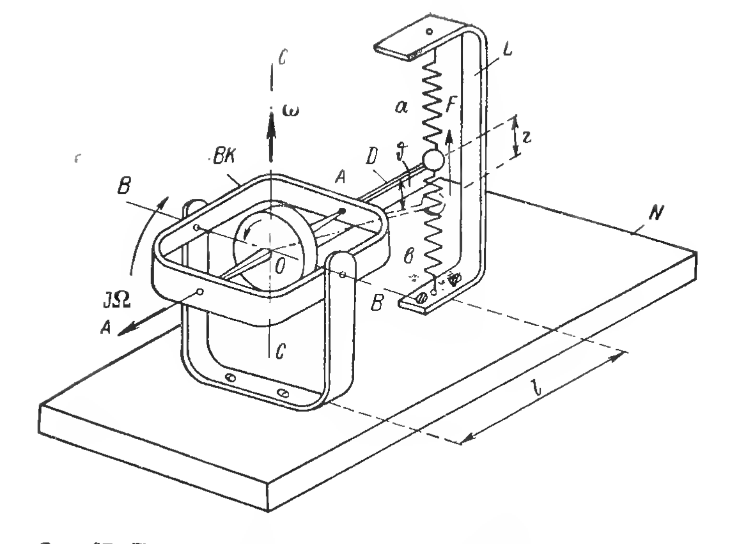


Рис. 87. Принципиальная схема гиротахометра.

нечником, с которым соединены концы спиральных пружин *а* и *в*. Их вторые концы закреплены на кронштейне *L*, также закрепленном на основании *N*. Наличие пружин ограничивает свободу вращения гироскопа вокруг оси *BB*, так как при таком повороте пружины деформируются и создают усилие, стремящееся возвратить гироскоп в исходное положение.

При повороте основания *N* вокруг оси *CC* с угловой скоростью ω гироскоп будет совершать вращение одновременно вокруг осей *AA* и *CC* с угловыми скоростями Ω и ω. Стремясь совместить свою главную ось *AA* с осью вынужденного поворота, гироскоп начнет вращаться вокруг оси *BB*. Вместе с гироскопом будет поворачиваться и стержень *D*, шаровой наконечник которого начнет деформировать пружины *а* и *в*. Одна из них будет растяги-

ваться на величину z, вторая — на столько же сжиматься.

В результате деформации пружин возникнет сила упругости F, стремящаяся возвратить гироскоп к нулевому положению, причем с увеличением угла ϑ поворота гироскопа вокруг оси BB деформация z пружин возрастет, увеличивая силу упругости F. При некотором значении угла ϑ сила F создаст на плече l момент Fl, уравновешивающий момент гироскопической реакции. В соответствии с формулой (3) в это мгновение наступит равенство моментов

$$Fl = J\Omega\omega$$

и движение гироскопа вокруг оси BB прекратится.

Сила F зависит от деформации z пружин, в свою очередь зависящей от угла ϑ поворота гироскопа. Поэтому и момент Fl будет зависеть от угла ϑ. Обозначая коэффициент пропорциональности этой зависимости через k, перепишем последнее равенство в виде

$$Fl = k\vartheta = J\Omega\omega,$$

откуда следует

$$\vartheta = \frac{J\Omega\omega}{k}.$$

Поскольку кинетический момент $J\Omega$ и коэффициент k в каждом приборе остаются величинами постоянными, то угол ϑ поворота гироскопа является мерой угловой скорости ω. Описанный прибор, как видим, позволяет измерять угловую скорость вращения его основания, отчего и был назван **гироскопическим тахометром**, т. е. измерителем скорости вращения. Его называют еще **гиротахометром с двумя степенями свободы**, в связи с тем что ротор гироскопа обладает в данном случае свободой вращения лишь вокруг двух осей: AA и BB.

Устанавливая описанный гиротахометр на самолете, получают возможность определять направление и измерять величину угловой скорости его вращения. Прибор преимущественно используют для определения скорости вращения самолета вокруг вертикальной оси $O_C z_C$ (рис. 88). С этой целью ось BB гиротахометра совмещают с продольной осью $O_C x_C$ самолета. Гиротахометр может быть использован для измерения угловых скоростей самолета и вокруг его продольной $O_C x_C$ или поперечной $O_C y_C$ осей. Для этого ось $O_C C$ прибора необходимо совмещать или располагать параллельно той оси, угловая скорость вращения вокруг которой должна быть измерена.

При прямолинейном полете ротор гиротахометра вращается лишь вокруг оси AA. Никакие моменты относительно оси BB на гироскоп не действуют, и пружина a удерживает его в нулевом положении, при котором главная ось AA параллельна плоскости $x_C O_C y_C$ самолета. Но при возникновении отклонения самолета от прямолинейного курса, например в результате его поворота вокруг оси $O_C z_C$, гироскопу сразу же будет сообщено вращение вокруг двух осей: AA и $O_C z_C$. В силу этого обстоятельства гироскоп, согласно изложенному в § 11 (см. рис. 27), повернется вокруг оси BB и его главная ось AA примет угол ϑ наклона к плоскости $x_C O_C y_C$ самолета, при котором момент, создаваемый пружиной a, уравновесит момент гироскопической реакции.

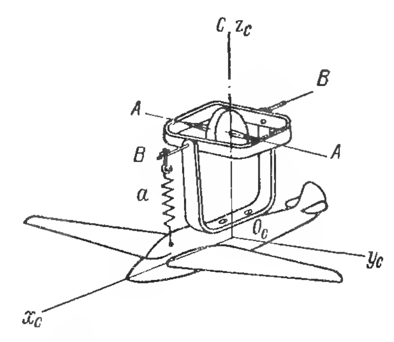


Рис. 88. Установка гиротахометра на самолете.

По величине и направлению угла ϑ пилот и судит об угловой скорости отклонения самолета от заданного курса. Для удобства наблюдения за показаниями

прибора его карданово кольцо снабжают стрелкой, а на корпусе устанавливают шкалу с нанесенными на ней в выбранном масштабе делениями.

27

Гироскопический указатель поворотов

Для выдерживания самолета на заданном курсе не обязательно определять величину угловой скорости его поворота вокруг оси $O_C z_C$. Достаточно для этой цели получить указание о возникновении такой скорости и ее направлении. Поэтому в авиации гиротахометром часто пользуются не для количественного измерения угловых скоростей поворота самолета, а лишь для получения информации о самом факте их возникновения.

Конструкция указателя поворотов аналогична гиротахометру. В обоих приборах гироскоп через рычажную передачу связывают со стрелкой L (рис. 89). Ее перемещения

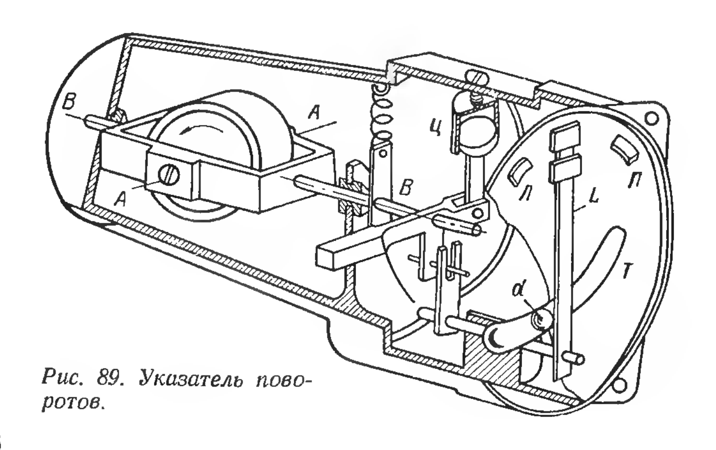


Рис. 89. Указатель поворотов.

по шкале и позволяют оценивать величину угловой скорости поворота самолета. В описываемом указателе поворотов шкала с делениями заменена диском с тремя марками: центральной, не имеющей обозначений, правой *П* и левой *Л*. Для успокоения колебаний гироскопа и связанной с ним стрелки *L* прибор снабжают демпфером.

Одним из вариантов последнего может быть жестко укрепленный в корпусе прибора цилиндр *Ц*, внутри которого находится поршень, шарнирно соединенный с осью *BB* гироскопа. При его колебаниях вокруг оси *BB* поршень, перемещаясь внутри цилиндра *Ц*, сжимает в нем воздух, не успевающий выходить из цилиндра через малое отверстие в его крышке. Сопротивление воздуха внутри цилиндра *Ц*, тем большее, чем с большей скоростью происходит в нем перемещение поршня, и обеспечивает успокоение колебаний гироскопа.

В большинстве конструкций гироскопический указатель поворотов снабжают маятниковым кренометром, выполненным в виде изогнутой по некоторому радиусу трубки *Т*, внутри которой свободно перемещается шарик *d*.

Пользуясь гироскопическим указателем поворотов, летчики контролируют правильность выполнения виражей при разворотах самолета вокруг вертикали. Учитывая, что при правильном вираже шарик *d*, как и обычный маятник, устанавливается по равнодействующей силы тяжести и центробежной силы инерции,— летчик, совершая разворот, может следить не только за положением стрелки гиротахометра, но и за положением шарика кренометра. Вот почему указатель пово-



Рис. 90. Авиационный указатель поворотов при снятой крышке.

ротов и завоевал одно из основных мест среди авиационных навигационных приборов. Он обязателен не только для каждого самолета, но и для каждого современного планера.

Чтобы читатель мог составить представление о конструкции авиационного гироскопического указателя поворотов, на рис. 90 показана одна из современных моделей прибора. Аналогичными указателями поворотов пользуются и моряки для выдерживания курса корабля при движении в узких проходах, когда, как уже говорилось выше (§ 24), отклонение от заданного направления движения недопустимо.

28

Авиационный гироскоп направления

Несмотря на то, что гироскопический указатель поворотов позволяет выдерживать прямолинейный полет и совершать правильные развороты самолета, пользование одним этим прибором при выполнении слепого полета крайне затруднительно. В самом деле, представим себе, что самолету было задано направление полета AB (рис. 91), по которому и совершалось его перемещение, начиная от пункта A. Из-за различных возмущений самолет в точке C начал откло-

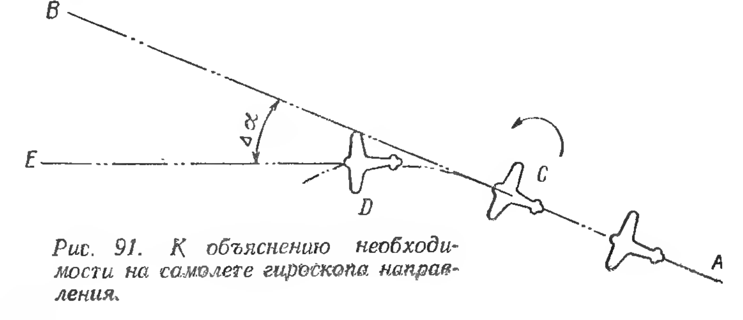


Рис. 91. К объяснению необходимости на самолете гироскопа направления.

няться от заданного курса AB, поворачиваясь вокруг вертикали в направлении против часовой стрелки.

При наличии на самолете гироскопического указателя поворотов начавшееся отклонение будет сразу же зафиксировано прибором, стрелка которого отклонится от нулевой черты на шкале указателя. Однако летчик в момент нахождения самолета в точке C мог наблюдать показания какого-либо другого контрольного прибора и обратил внимание на шкалу гироскопического указателя поворотов только в точке D пути, когда самолет уже отклонился от заданного курса на угол $\Delta\alpha$.

Как только пилот заметит по указателю поворотов вращение самолета, он сразу же прекратит это движение и вновь будет выдерживать прямолинейный полет, но уже не в направлении AB, а по новому курсу DE, составляющему с прежним угол $\Delta\alpha$. По шкале указателя поворотов, так же как и по шкале гиротахометра, летчик не сможет определить величину угла $\Delta\alpha$ и, следовательно, не устранит накопившуюся ошибку.

Выдерживание же прямолинейного полета самолета по показаниям лишь одного гироскопического указателя поворотов требует непрерывного наблюдения за его стрелкой, что утомляет пилота. Для устранения этого недостатка необходимо иметь на самолете еще один прибор, который позволял бы оценивать направление полета не в результате непрерывного наблюдения за показаниями прибора, а лишь по кратковременным взглядам на его шкалу. Именно таким прибором и является **авиационный гироскоп направления**.

Принципиальная схема гироскопа направления приведена на рис. 92. Гироскоп прибора имеет три степени свободы и установлен в корпусе, жестко укрепленном на самолете так, что его наружная ось CC перпендикулярна к плоскости $x_C O_C y_C$ крыльев. При горизонтальном полете наружная ось CC такого гироскопа совмещена с вертикалью ZZ, а его главная ось AA, вокруг которой с доста-

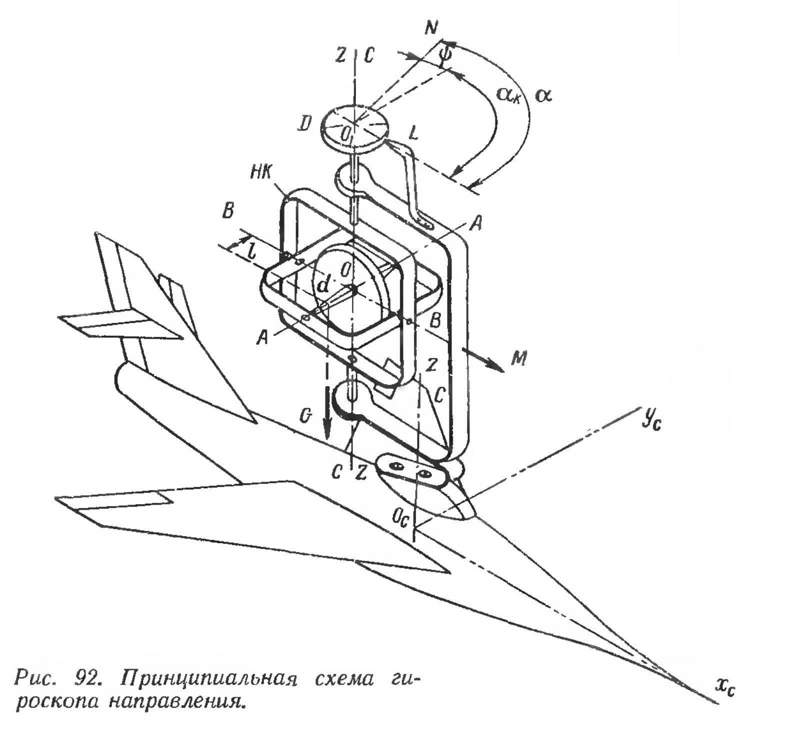


Рис. 92. Принципиальная схема гироскопа направления.

точно большой угловой скоростью вращается ротор, сохраняет свое направление стабильным в пространстве. Поэтому направление полета самолета можно оценивать величиной угла $\alpha_к$, называемого углом компасного курса, образуемого продольной осью $O_C x_C$ самолета с плоскостью AOC гироскопа.

Для удобства замера угла $\alpha_к$ наружное кольцо $НК$ гироскопа снабжают диском, или так называемой картушкой, D с нанесенной на нем шкалой, разделенной на 360°, а корпус прибора — индексом L, остающимся неподвиж-

ным относительно плоскости самолета. Черту, соединяющую деления 0 и 180° шкалы картушки D, совмещают с плоскостью AOC гироскопа. Поэтому если угол ψ отклонения оси AA от плоскости NO_1Z меридиана известен, то посредством гироскопа может быть измерен и истинный курс α самолета, равный сумме двух углов:

$$\alpha = \psi + \alpha_к.$$

Однако пользоваться подобным способом измерения истинного курса α в течение продолжительного времени практически невозможно. Свободный гироскоп, как известно (§ 14), сохраняя свою главную ось неподвижной в пространстве, непрерывно отклоняется от плоскостей горизонта и меридиана. Поэтому и в рассматриваемом случае его главная ось AA будет непрерывно изменять величину угла ψ, составляемого ею с плоскостью NO_1Z меридиана. Указанная причина усложняет использование гироскопа с тремя степенями свободы для измерения истинного угла курса α самолета.

Для устранения этого недостатка необходимо, чтобы главная ось AA, а вместе с ней и нулевая черта картушки D гироскопа оставались неизменно совмещенными с плоскостью NO_1Z меридиана. Иными словами, гироскоп должен непрерывно поворачиваться вокруг вертикали ZZ вслед за меридианом, как бы догоняя его в пространстве. Чтобы вызвать прецессионное движение гироскопа вокруг вертикали ZZ, необходимо, как известно (§ 11), создать момент M внешней силы, действующий на гироскоп относительно его внутренней оси подвеса BB. При этом условии возникнет вращение гироскопа вокруг требуемой оси которое согласно зависимости (7) будет происходить с угловой скоростью $\omega = M/J\Omega$.

Постоянно действующий на гироскоп относительно оси BB момент M может быть создан весьма простыми средствами. Достаточно сместить центр тяжести d гироскопа относительно точки O его подвеса вдоль главной оси AA

на величину l, чтобы сила G веса гироскопа создала действующий на него относительно оси BB момент $M = Gl$. Подбирая необходимую величину внешнего момента M, создают угловую скорость ω прецессионного движения гироскопа, обеспечивающую неизменное совмещение его главной оси AA с плоскостью NO_1Z меридиана.

Конструктивное выполнение простейшего авиационного гироскопа направления показано на рис. 93. Для наблюдения за картушкой гироскопа с лицевой стороны корпуса прибора выфрезеровано смотровое окно, по оси симметрии которого установлен индекс в виде тоненькой проволочки. Отверстие смотрового окна защищено прочным стеклом, предохраняющим чувствительную часть прибора от возможных внешних повреждений.

Авиационные гироскопы направления часто снабжаются еще и задающей шкалой, пользуясь которой пилот устанавливает для памяти заданный курс полета. Эта вторая задающая шкала ничем не связана с гироскопом. Она соединена лишь с корпусом прибора, относительно которого ее положение может устанавливаться произвольно поворотом одной из рукояток, размещенных на лицевой стороне прибора. В некоторых моделях авиационные гироскопы направления снабжаются дополнительно маятниковым кренометром, как это видно на фотографии.

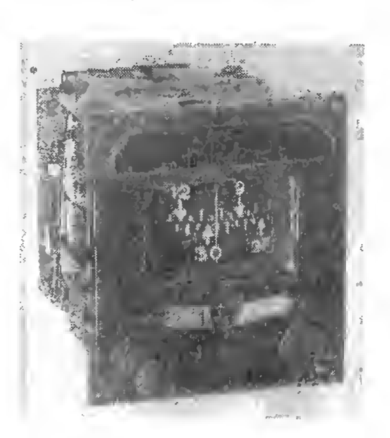


Рис. 93. Авиационный гироскоп направления со снятой крышкой.

Наличие гироскопа направления избавляет летчика от необходимости непрерывно следить за стрелкой гироскопического указателя поворотов. Даже в том случае, когда он

пропустит момент начавшегося отклонения от направления AB и заметит совершающийся поворот самолета лишь в точке D (см. рис. 91), ошибка будет устранена, так как гироскоп направления при полете вдоль прямой DE будет фиксировать уже новый курс, отличный от первоначального на угол $\Delta\alpha$. Достаточно при этом, пользуясь гироскопом направления, развернуть самолет вокруг вертикали по часовой стрелке на угол $\Delta\alpha$, чтобы полет совершался вновь по заданному направлению AB.

Однако обеспечить неизменное совмещение главной оси AA гироскопа направления с плоскостью NOZ меридиана (рис. 92) в течение продолжительного времени практически трудно. Силы трения, неизбежно существующие в опорах подвеса, неточности балансировки, люфты в подшипниках и другие причины, связанные с ошибками при изготовлении и регулировке прибора, обусловливают возникновение вредных возмущающих моментов, вызывающих отклонение гироскопа от первоначального положения.

Существенным недостатком прибора является также то, что при отклонении вследствие тех или иных возмущающих моментов главной оси AA гироскопа от плоскости NOZ меридиана она даже и после прекращения действия возмущающих моментов не возвратится в прежнее положение. Главная ось AA будет сохранять теперь новое направление, в котором она находилась в то мгновение, когда прекратилось воздействие моментов возмущающих сил. Это новое положение сохранится до тех пор, пока какие-либо возмущения опять не вызовут новых отклонений гироскопа от плоскости меридиана.

Поскольку воздействие возмущающих сил происходит непрерывно, то отклонение простейших гироскопов направления от заданного положения происходит довольно быстро: примерно 5° за 15 *мин.* Поэтому таким прибором можно пользоваться непродолжительное время, например при виражах самолета, преодолевая облака, туманности, грозовые тучи и т. п. Для повышения точности гироскопа

направления применяются специальные устройства, обеспечивающие уменьшение моментов сил трения и люфтов в опорах подвеса, увеличение точности изготовления и балансировки отдельных деталей и узлов гироскопа, а также используются регулируемые электромеханические элементы для создания момента, обеспечивающего более точное совмещение главной оси гироскопа с плоскостью меридиана в течение продолжительного времени.

Одновременно с усложнениями конструкции прибора предпринимались поиски иных путей, гарантирующих постоянство совмещения главной оси гироскопа с плоскостью меридиана. Решение этой задачи впервые в мире было найдено советскими конструкторами, создавшими принципиально новый гироскопический прибор, названный гиромагнитным компасом.

29

Авиационный гиромагнитный компас

Основным элементом гиромагнитного компаса является гироскоп, на геометрическом продолжении наружной оси *СС* которого (рис. 94) расположена независимо подвешенная магнитная стрелка *ns*, несущая на себе контактный движок *r*. На диске, жестко соединенном с наружным кольцом *НК*, смонтированы две изолированные контактные ламели b_1 и b_2. При отклонении оси *АА* от плоскости N_mOZ магнитного меридиана, с которой совмещена стрелка *ns*, движок *r* придет в соприкосновение с одной из ламелей: b_1 или b_2. В результате через одну из двух обмоток электромагнита *ЭМ*, неподвижно укрепленного на кольце *НК*, пойдет электрический ток.

При включении в цепь электрического тока обмотки электромагнита *ЭМ* возникнет магнитный поток, который,

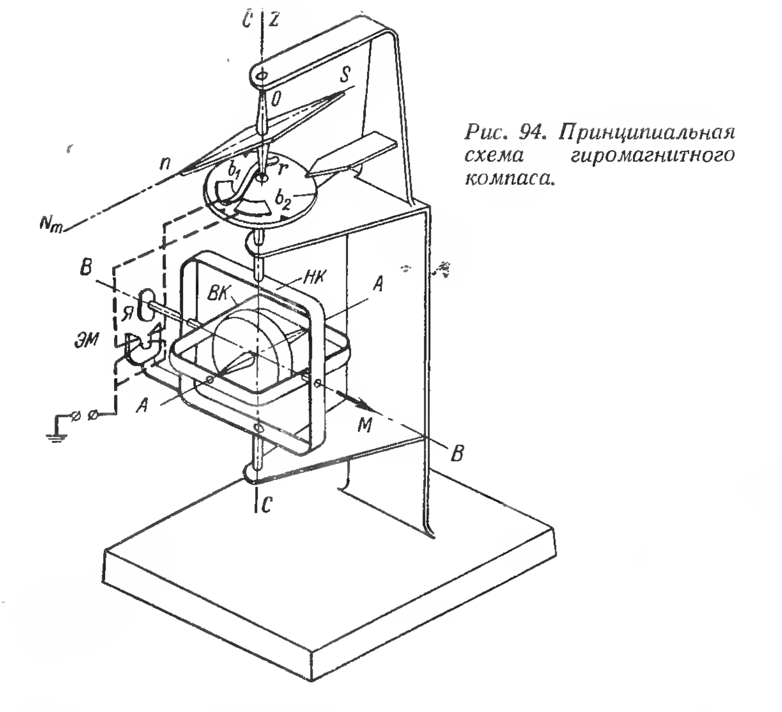


Рис. 94. Принципиальная схема гиромагнитного компаса.

воздействуя на якорек *Я*, укрепленный на оси внутреннего кольца *ВК*, создаст момент *М*, стремящийся повернуть гироскоп вокруг оси *ВВ*. Но, как известно (см. § 11), при воздействии на быстро вращающийся вокруг оси *АА* гироскоп момента *М* относительно оси *ВВ* возникнет прецессия вокруг оси *СС*. Это движение будет происходить до тех пор, пока ось *АА* вновь не совместится с плоскостью N_mOZ магнитного меридиана. В этот момент движок *r* выйдет из соприкосновения с контактной ламелью и прекратит питание электромагнита *ЭМ* и его воздействие на гироскоп.

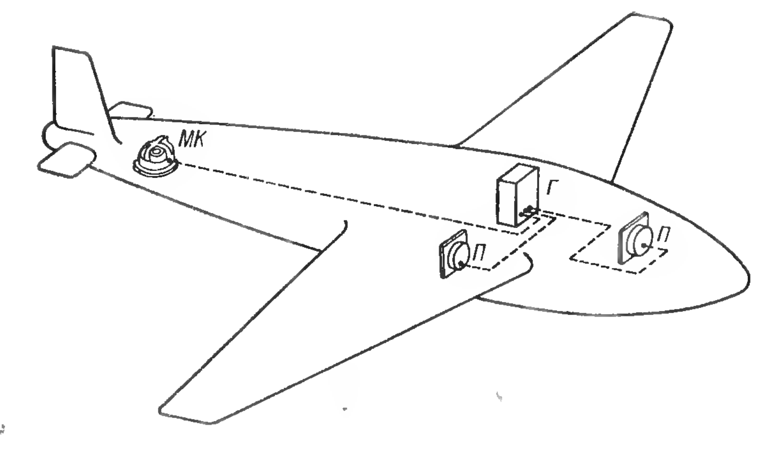


Рис. 95. Размещение на самолете агрегатов дистанционного гиромагнитного компаса.

Такова в кратких чертах принципиальная сущность работы гиромагнитного компаса, главная ось AA которого, благодаря коррекции гироскопа от магнитной стрелки, удерживается в плоскости магнитного меридиана. Однако необходимо иметь в виду, что при установке магнитной стрелки в непосредственной близости от гироскопа возникают ошибки, о которых уже говорилось выше (см. § 16). И железные массы, и токонесущие проводники, расположенные вблизи магнитной стрелки, будут оказывать вредное влияние, вызывающее ее отклонение от магнитного меридиана.

Для устранения этих недостатков магнитную стрелку на современных самолетах стремятся отнести на возможно более удаленное расстояние от двигателей и кабины летчика, устанавливая ее в концах крыльев или хвостовой части фюзеляжа. Монтируя магнитный компас *МК* (рис. 95) отдельно от гироскопического прибора *Г*, в корпусе последнего вместо магнитной стрелки устанавливают элемент сле-

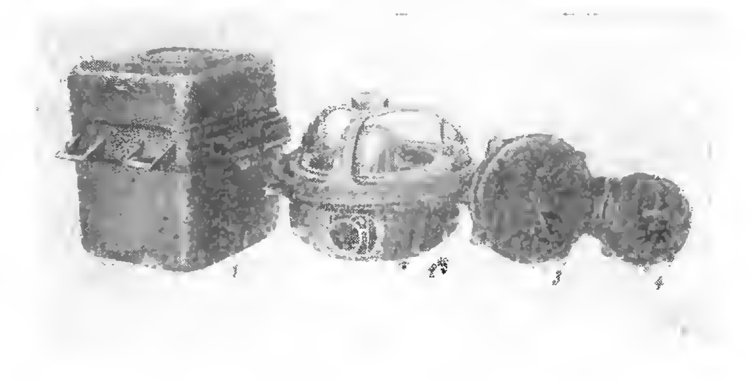


Рис. 96. Комплект дистанционного гиромагнитного компаса.
1 — гироскопический узел; 2 — магнитный компас; 3 — повторитель штурмана; 4 — повторитель летчика.

дящей системы, имеющий свободу вращения вокруг оси *СС* гироскопа. Связывая указанный элемент со стрелкой магнитного компаса посредством синхронной передачи, обеспечивают точное повторение установленным на нем, как и на магнитной стрелке (рис. 94), движком *r* всех перемещений стрелки магнитного компаса *МК* (рис. 95).

Преимуществом описываемого прибора, получившего название **дистанционного гиромагнитного компаса**, является то, что на магнитную стрелку, смонтированную в хвостовой части фюзеляжа, действуют значительно меньшие возмущающие моменты, чем на стрелку, размещенную непосредственно в корпусе гироскопического прибора. Поэтому вождение самолета с помощью дистанционного гиромагнитного компаса будет осуществляться точнее, чем при пользовании гиромагнитным компасом, стрелка которого смонтирована непосредственно в его корпусе.

Для передачи показаний гиромагнитного компаса в кабину штурмана и на приборную доску летчика рассматри-

ваемое устройство снабжается повторителями *П*, аналогичными по своей конструкции повторителям гирокомпаса (см. § 20). Дистанционные гиромагнитные компасы (рис. 96), питаемые электрическим током, получили широкое распространение не только в авиации. Малые габариты, простота обслуживания и надежность в работе обеспечили им практическое применение и на малотоннажных судах морского флота.

30

Авиационный гироскопический горизонт

Самолет, находящийся в воздухе, может принимать любое положение относительно плоскостей горизонта и меридиана. Поэтому для выполнения прямолинейного слепого полета самолет должен быть оборудован приборами, которые позволяли бы контролировать не только курс, но и горизонтальность полета. С этой целью на современных самолетах используются гироскопические приборы, главная ось которых сохраняет направление вертикали. Однако здесь необходимо иметь в виду, что такие функции не могут быть выполнены свободным гироскопом даже и при совмещении его главной оси в начальный момент времени с истинной вертикалью.

В самом деле, если бы полет совершался по показаниям гироскопа с тремя степенями свободы, главная ось которого при старте была совмещена с радиусом Земли O_3Z (рис. 97), то движение самолета было бы прямолинейным относительно неподвижных звезд, а не относительно земной поверхности. В практике же самолетовождения необходимо как раз соблюдение последнего условия. Поэтому под прямолинейным горизонтальным полетом принято понимать перемещение самолета на постоянной высоте h над земной поверхностью по дуге окружности по-

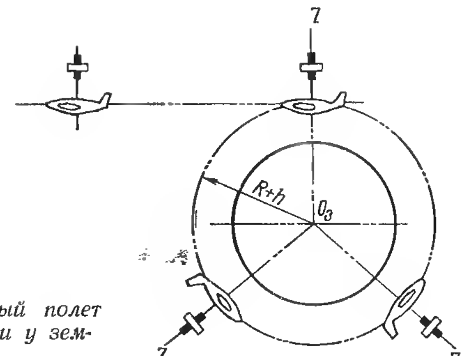


Рис. 97. Прямолинейный полет в мировом пространстве и у земной поверхности.

стоянного радиуса, равного сумме земного радиуса R и высоты полета h.

Таким образом, главная ось гироскопа, предназначенного для выдерживания горизонтального полета, должна быть неизменно совмещена с истинной вертикалью O_3Z, которая как известно (см. § 14), непрерывно изменяет свое положение в пространстве. Указанное условие может быть выполнено лишь при наличии в системе гироскопического прибора таких сил, которые создавали бы моменты, удерживающие главную ось гироскопа в совмещении с истинной вертикалью.

В авиационном гироскопическом горизонте, применявшемся на самолетах в 1914—1916 гг. (см. рис. 85), в качестве такой удерживающей силы использовалась сила веса его ротора. Для уяснения принципа работы прибора обратимся к схеме на рис. 98. На ней, в отличие от действительной конструкции, ротор прибора изображен не опирающимся на острие, а подвешенным на штанге *Ш*, оканчивающейся шаровой опорой. Такое изменение схемы ни в коей мере не искажает принципа работы рассматриваемого прибора и сделано с целью обеспечить бóльшую наглядность объяснения его физической сущности.

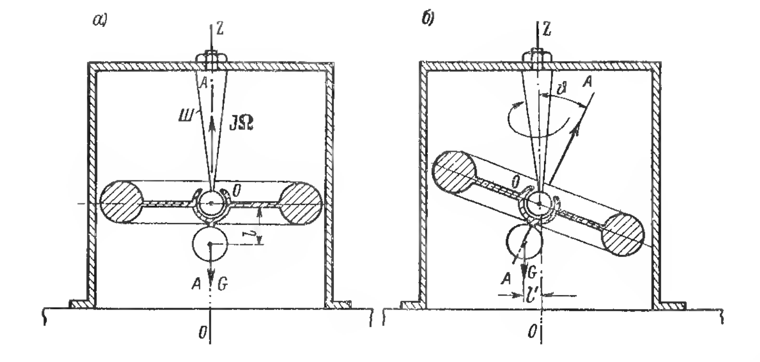


Рис. 98. Принцип устройства маятниковой гировертикали.

Центр тяжести ротора смещен от точки подвеса O вниз, вдоль оси AA на расстояние l, что условно показано на схеме в виде шарового груза. До тех пор пока ось AA сохраняет вертикальное положение, сила G веса ротора проходит через точку подвеса O и поэтому никаких моментов относительно нее не создает. Вектор кинетического момента $J\Omega$ гироскопа, совмещенный с его осью AA, направлен в данном случае по вертикали OZ (рис. 98, *а*).

Если же ось AA начнет отклоняться от вертикали OZ, то при угле наклона ϑ сила G начнет создавать относительно точки O момент Gl', тем больший, чем больше проекция l' на горизонтальную плоскость смещения l центра тяжести гироскопа от точки O его подвеса. В рассматриваемом случае (рис. 98, *б*) вектор момента Gl' перпендикулярен к плоскости чертежа и направлен из точки O на читателя.

Под влиянием момента Gl' гироскоп начнет прецессировать так, чтобы по кратчайшему пути привести свою главную ось AA и направленный по ней вектор кинетического момента $J\Omega$ к совмещению с вектором внешнего момента Gl'. Они начнут выходить из плоскости чертежа,

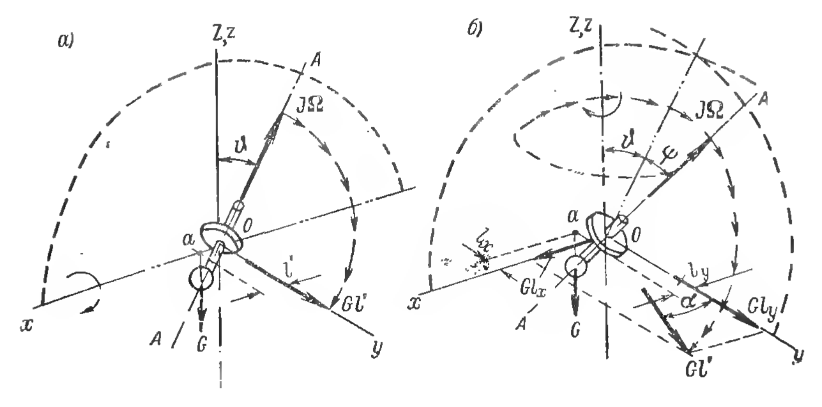


Рис. 99. К объяснению работы маятниковой гировертикали.

двигаясь своими верхними концами на читателя. Так как точка подвеса гироскопа остается неподвижной, то нижний конец оси AA, а следовательно, и шаровой груз будут отклоняться за плоскость чертежа, поворачивая вокруг точки подвеса O и вектор момента Gl'.

Это движение легко проследить по схеме, приведенной на рис. 99. Представим себе, что гироскоп со смещенным центром тяжести, называемый гироскопическим маятником, или маятниковой гировертикалью, отклонился от истинной вертикали OZ на угол ϑ, совершив поворот вокруг оси Oy. При этом его ось AA переместится строго в плоскости xOz, в связи с чем направление силы G его веса уже не пройдет через точку O, а будет пересекать ось Ox в точке a, удаленной от оси Oy на расстояние l' (рис. 99, a).

Сила G создаст относительно оси Oy момент Gl', благодаря чему ось AA гироскопа, а с ней вместе и вектор кинетического момента $J\Omega$ начнут двигаться к совмещению с вектором момента Gl'. Но как только гироскоп повернется вокруг оси Ox и его главная ось AA составит с пло-

скостью xOz угол ψ (рис. 99, *б*), сразу же точка a пересечения направления действия силы G с плоскостью xOy сместится с оси Ox. Теперь она будет отстоять от оси Ox на расстояние l_x и от оси Oy на расстояние l_y. В связи с этим сила G веса гироскопа создаст моменты Gl_y и Gl_x соответственно относительно осей Oy и Ox.

Вектор суммарного момента Gl' уже не будет совмещен с осью Oy и составит с ней некоторый угол α. Главная ось AA гироскопа, непрерывно движущаяся к совмещению с вектором момента Gl', пойдет теперь по образующей конуса с весьма малым углом при вершине. И так как вместе с гироскопом поворачивается вокруг вертикали OZ и вектор момента Gl', удаляющийся от плоскости yOz на все увеличивающийся угол α, то возникшее движение будет продолжаться и далее. В результате главная ось AA будет совершать непрерывные конусообразные колебания около истинной вертикали OZ. При этом, благодаря весьма малому углу рассогласования между осями AA и OZ, по положению главной оси маятниковой гировертикали можно с достаточной для практики точностью судить о направлении истинной вертикали OZ.

Но маятниковая гировертикаль не получила распространения в авиации. Объясняется это тем, что для непрерывного выдерживания ее главной оси в непосредственной близости от истинной вертикали необходим значительный по величине момент, создаваемый силой веса гироскопа. Для обеспечения высокой точности прибора приходится утяжелять ротор, что влечет за собой и рост габаритов прибора. При малых же размерах ротора, малом его весе и малой величине маятникового момента, возникающего при отклонении главной оси гироскопа от истинной вертикали, не удается преодолеть моменты сил трения в опорах подвеса и тем самым создать нормальные условия работы прибора.

По этим причинам маятниковая гировертикаль и не могла быть использована в авиации. Однако она, как уже

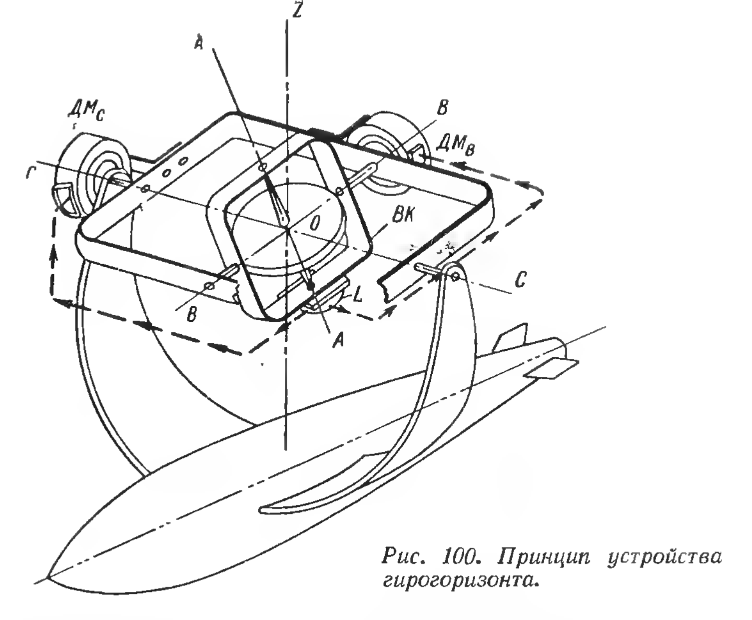


Рис. 100. Принцип устройства гирогоризонта.

говорилось выше (§ 24), нашла себе применение в морском флоте. В авиации же для сохранения вертикального положения главной оси небольшого по размерам гироскопа применяется метод корректирования его положения по показаниям физических маятников, аналогично тому как осуществляется коррекция гироскопа по магнитной стрелке в гиромагнитном компасе (см. § 29).

Представим себе гироскоп с тремя степенями свободы, центр тяжести которого совмещен с точкой O его подвеса (рис. 100). На внутреннем кардановом кольце BK в специальной оправе L смонтированы два маятника, один из которых фиксирует повороты гироскопа вокруг его внутренней BB, второй — вокруг наружной CC осей подвеса. Аналогично магнитной стрелке ns и связанному с ней кон-

тактному движку r в гиромагнитном компасе (см. рис. 94) каждый маятник может замыкать одну из двух контактных ламелей, жестко укрепленных на кольце BK.

При отклонении оси AA гироскопа от истинной вертикали OZ, что может произойти только в результате его поворота вокруг осей BB или CC, каждый маятник, сохраняющий вертикальное положение, переместится относительно гироскопа и замкнет соответствующую контактную ламель своей пары, подав тем самым электрический ток в двигатели $ДМ$, называемые обычно датчиками моментов. При этом маятник, фиксирующий углы поворота гироскопа вокруг оси BB, управляет работой датчика момента $ДМ_C$, создающего корректирующий момент относительно наружной оси CC. Второй маятник, фиксирующий углы поворота вокруг оси CC, управляет датчиком момента $ДМ_B$. Воздействие на гироскоп внешних моментов, создаваемых двигателями датчиков моментов $ДМ_B$ и $ДМ_C$, и приводит его главную ось к совмещению с истинной вертикалью OZ.

Описанный гироскопический прибор получил название гирогоризонта. Используемые в нем корректирующие устройства выполняются в самых разнообразных вариантах [71, 115, 118]. Однако вне зависимости от их конструктивной разновидности принципиальная сущность корректирующих устройств остается одной и той же. Маятники той или иной конструкции фиксируют отклонение главной оси гироскопа от истинной вертикали и включают в работу механизмы, создающие внешние, воздействующие на гироскоп моменты. Под их воздействием гироскоп начинает прецессировать, в результате чего его главная ось и приходит к совмещению с истинной вертикалью.

Часто в целях экономии места на приборной доске самолета, которая занята большим количеством приборов, авиационные гирогоризонты монтируют в одном корпусе с гироскопическим указателем поворотов (см. рис. 89). Такой комбинированный прибор (рис. 101) совмещает гиро-

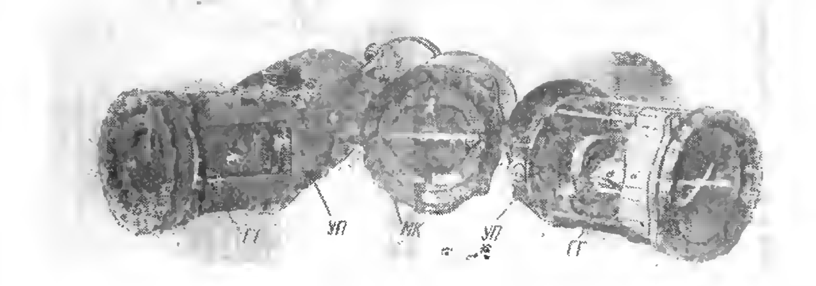


Рис. 101. Комбинированный гирогоризонт.

горизонт *ГГ*, гироскопический указатель поворотов *УП* и маятниковый креномер *МК*. Для большей наглядности на рисунке приведен один и тот же гироскопический комбинированный прибор в трех видах. Прибор с предварительно снятой защитной крышкой установлен под различным углом зрения к объективу, благодаря чему читатель может составить представление о компоновке прибора и о его наружном виде со стороны шкалы.

31

Автоматический штурман

С ростом скорости, высоты и дальности беспосадочных полетов усложнилась работа по определению местоположения летящего самолета, который на протяжении большого участка пути совершает движение в условиях отсутствия видимости земных ориентиров. Возникла необходимость в приборе, автоматически вычисляющем пройденный самолетом путь.

Наличие гироскопа позволило создать такой прибор. Он был назван автоматическим штурманом, который непрерывно записывал пройденный самолетом путь,

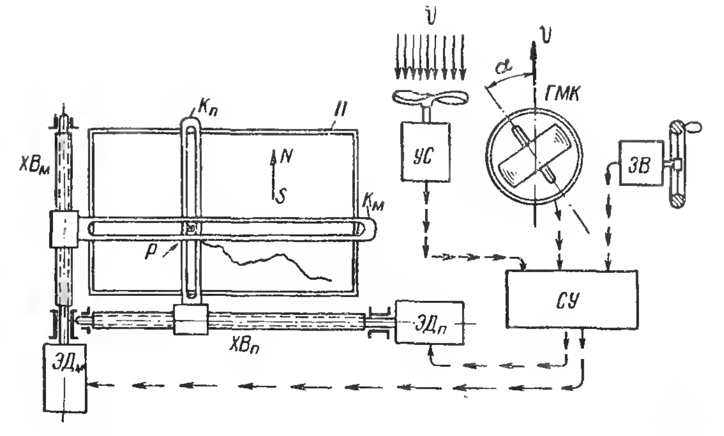


Рис. 102. Принципиальная схема автоштурмана.

подобно автоматическому курсографу, регистрирующему движение корабля (см. рис. 74). Прообразом таких приборов, регистрирующих на бумажной ленте курс корабля, самолета или любой другой подвижной платформы, явился самопишущий магнитный компас, разработанный М. В. Ломоносовым еще в 1759 г. [76]. Отечественный навигационный полуавтомат-курсограф был разработан В. Ю. Поляком в 1929 г. Позже решению этой задачи посвятили свой труд многие советские специалисты.

Автоматический штурман принципиально состоит из планшета *П* (рис. 102) с закрепленной на нем картой предстоящего маршрута. Над картой размещены две взаимно перпендикулярные кулисы $К_м$ и $К_п$, в прорезях которых установлен соединяющий их между собой ползунок *Р*, несущий карандаш, соприкасающийся острием с плоскостью карты.

Каждая кулиса заканчивается гайкой, связывающей их с ходовыми винтами $ХВ_м$ или $ХВ_п$, приводимыми во вращение электродвигателями. Электродвигатель $ЭД_м$ вра-

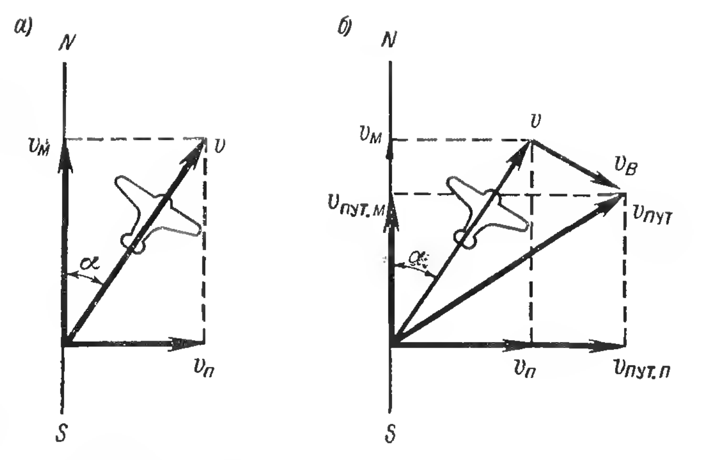


Рис. 103. Воздействие силы ветра на снос самолета с заданного курса.

щает ходовой винт $XB_м$, перемещающий кулису $K_м$ и заставлющий ползунок P двигаться вдоль меридиана карты. При вращении электродвигателя $ЭД_п$ ползунок P движется вдоль параллели. В результате соединенный с ползунком P карандаш вычерчивает на карте любой сложный след перемещения ползунка. Чтобы этот след соответствовал линии проходимого самолетом пути, перемещение ползунка необходимо производить со скоростью, пропорциональной скорости самолета. С этой целью в системе автоштурмана используется указатель скорости $УС$, показания которого передаются в счетно-решающее устройство $СУ$.

В общем случае направление воздушной скорости v самолета может занимать любое положение по отношению к плоскости меридиана NS (рис. 103, a). Поэтому для записи на карте проходимого самолетом пути его воздушную скорость v раскладывают на две составляющие: $v_м$ — вдоль меридиана и $v_п$ — вдоль параллели. Поскольку эти величины зависят от угла курса α, то в счетно-решающее

устройство *СУ* с гиромагнитного компаса *ГМК* (рис. 102) подается еще и значение угла курса α.

На величину скорости самолета относительно земной поверхности большое влияние оказывают ветры. Если скорость ветра совпадает с воздушной скоростью самолета, то его суммарная, или так называемая путевая, скорость относительной земной поверхности увеличивается.

Когда воздушная скорость самолета и скорость ветра противоположны, путевая скорость соответственно уменьшается. В общем случае скорость ветра $v_{\text{в}}$ порождает боковой снос самолета, вызывая его отклонение от заданного направления полета. В итоге путевая скорость $v_{\text{пут}}$ будет определяться геометрической суммой двух скоростей: воздушной скорости v самолета и скорости ветра $v_{\text{в}}$ (рис. 103, *б*).

Проекции путевой скорости $v_{\text{пут}}$ на направления вдоль меридиана $v_{\text{пут. м}}$ и вдоль параллели $v_{\text{пут. п}}$ будут уже отличны от проекции $v_{\text{м}}$ и $v_{\text{п}}$ на те же направления воздушной скорости v. При большом протяжении маршрута или сильном ветре ошибки записи пройденного пути вследствие сноса самолета могут достигать больших значений. Поэтому в автоштурманах предусматривается специальный задатчик скорости и направления ветра *ЗВ* (рис. 102), пользуясь которым штурман вручную вводит соответствующую поправку в счетно-решающее устройство *СУ*.

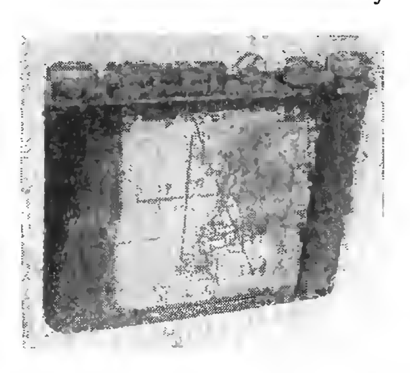


Рис. 104. Внешний вид планшета автоштурмана.

В результате соответствующей обработки сигналов, поступающих с указателя скорости *УС*, гиромагнитного компаса *ГМК* и задатчика ветра *ЗВ*, из счетно-

решающего устройства *СУ* подается на электродвигатели $ЭД_м$ и $ЭД_п$ напряжение, обеспечивающее перемещение кулис $К_м$ и $К_п$ строго в соответствии с путевыми скоростями самолета: $v_{пут.м}$ — вдоль меридиана и $v_{пут.п}$ — вдоль параллели (рис. 103, *б*). Благодаря этому карандаш ползунка *Р* (рис. 102) и вычерчивает на карте планшета *П*, общий вид которого показан на рис. 104, путь, проходимый самолетом.

32

Гироскопический автопилот

Применение гироскопа в авиации позволило не только производить автоматическое вычисление пройденного самолетом пути и тем самым облегчать работу штурмана, но и удерживать полет самолета в заданном направлении, облегчая работу пилота. Последнее имеет особо важное значение, так как выдерживание прямолинейного полета сопряжено для летчика с преодолением значительных трудностей. Воздушные течения, случайные порывы ветра, различия температуры и плотности отдельных слоев воздуха, неравномерная тяга, развиваемая двигателями, изменения в положении центра тяжести самолета, вызываемые расходом горючего, и ряд других причин порождают непрерывное воздействие возмущающих сил, отклоняющих самолет от заданного направления полета.

Изменяя положение рулей управления по отношению к корпусу самолета, летчик восстанавливает необходимое положение машины. Но, поскольку внешние возмущения действуют на самолет непрерывно, летчику все время приходится придавать рулям управления все новые и новые положения. Указанная работа монотонна и быстро приводит к утомлению пилота. Вот почему почти с первого дня зарождения авиации ученые и изобретатели всех стран

мира начали искать возможности автоматизации управления полетом. Так, еще в 1898 году наш великий соотечественник, основоположник науки о ракетоплавании К. Э. Циолковский разработал схему автоматического устройства для выдерживания, или, как говорят, стабилизации, горизонтального положения цельнометаллического дирижабля в продольной плоскости его движения [76].

Учеными и изобретателями предлагались самые различные варианты автоматических устройств, призванных облегчить работу летчика [51], однако только применение гироскопа дало возможность автоматически, без вмешательства пилота управлять полетом. Такое гироскопическое устройство получило название автоматического пилота, или, сокращенно, автопилота. Современные модели автопилотов автоматически управляют взлетом и посадкой самолетов, выдерживанием их в заданном направлении полета, выполнением разворотов и различных эволюций [34]. Основными приборами, фиксирующими отклонения самолета от заданного курса, являются гироскоп направления *ГН* и гирогоризонт *ГГ* (рис. 105).

По наружной оси гироскопа направления и по обеим осям подвеса гирогоризонта установлены движки потенциометров *П*, обмотки которых укреплены на корпусах приборов, оставаясь неподвижными относительно фюзеляжа. Поэтому при поворотах самолета вместе с ним перемещаются в пространстве и обмотки потенциометров, в то время как их движки, благодаря жесткому креплению на гироскопах, сохраняют неизменное положение. В результате при любом отклонении самолета от заданного направления полета происходит перемещение движков по обмоткам соответствующих потенциометров. Снимаемые с них при этих перемещениях сигналы направляются сначала в усилители *УС*, откуда после значительного усиления подаются на рулевые машинки *РМ*.

Как только сигнал поступит на рулевую машинку, сразу же начинает вращаться ее ведущий шкив, вызывающий

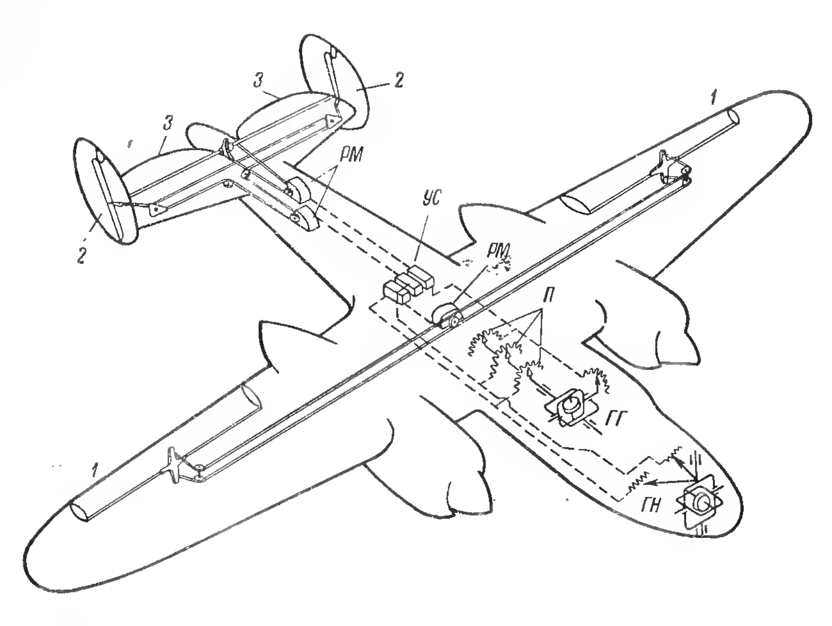


Рис. 105. Принципиальная схема автопилота.

1 — элероны; *2* — рули направления; *3* — рули глубины.

при помощи тросов необходимое перемещение соответствующих рулей управления самолетом, благодаря чему он начинает возвращаться к первоначальному направлению полета. В процессе этого возвращения происходит обратное перемещение обмоток потенциометров *П* по отношению к сохраняющим неизменное положение в пространстве движкам. Электрический сигнал, снимаемый с потенциометров, уменьшается, вызывая тем самым и уменьшение углов поворота рулей управления по отношению к их нормальному, нейтральному положению.

В тот момент, когда самолет возвратится к заданному направлению полета, движки совместятся с нулевыми

точками обмоток потенциометров, и сигнал, снимаемый с них, становится равным нулю. Дальнейший полет самолета происходит уже в прямолинейном направлении, пока новое возмущение не вызовет его отклонения от заданного направления полета. Вновь совершится описанный цикл работы автопилота, возвращающий самолет к исходному положению.

Так как для правильного разворота самолета в пространстве необходим совместный, или, как говорят, координированный, поворот рулей, в современных автопилотах сигналы, снимаемые с потенциометров *П* гироскопа направления *ГН* и наружной оси подвеса гирогоризонта *ГГ*, подаются в определенной пропорции одновременно на две рулевые машинки, одна из которых управляет элеронами, а вторая — рулями поворота. Сигнал, снимаемый с внутренней оси гирогоризонта *ГГ*, пропорциональный повороту самолета вокруг его продольной оси, подается через усилитель только на рулевую машинку, управляющую рулями высоты. Такова в общих чертах принципиальная схема работы одного из вариантов автопилота, большое количество которых имеется в настоящее время не только для самолетов, но также и для других летательных аппаратов.

33

Управляющий гироскоп вертолета

Одной из разновидностей летательных аппаратов является вертолет, получивший широкое распространение в авиации. Отсутствие крыльев, роль которых играет несущий винт, делает вертолет специфически отличным от самолета. Изменением положения несущего винта относительно плоскости горизонта обеспечивают как вертикальный подъем вертолета, так и его горизонтальное поступательное движение. Ука-

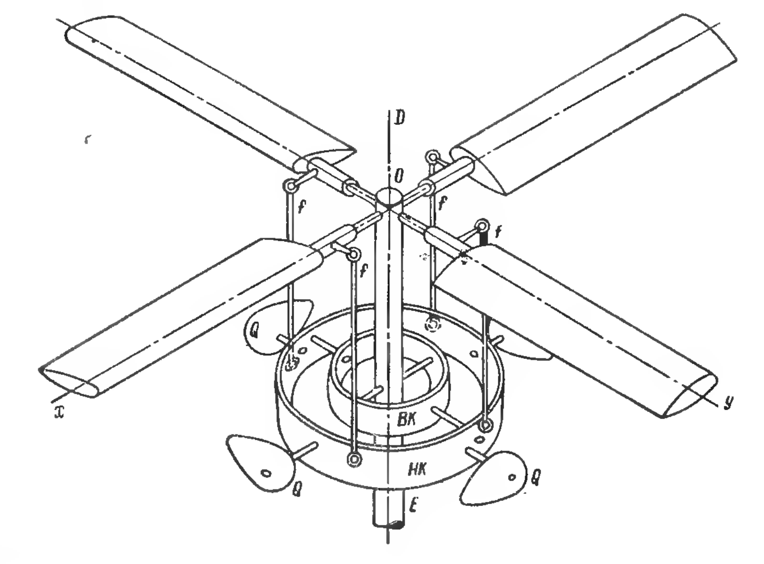


Рис. 106. Гироскоп, управляющий вертолетом.

занное изменение положения несущего винта осуществляется с помощью автомата перекоса, позволяющего отклонять плоскость xOy лопастей несущего винта (рис. 106) от оси OD приводного вала E, сохраняющей неизменно перпендикулярное положение по отношению к фюзеляжу вертолета.

Воздействуя усилием мышц на рычаги управления автоматом перекоса, летчик придает плоскости xOy лопастей несущего винта необходимый угол относительно оси OD, создавая тем самым требуемый режим полета. При перпендикулярности плоскости xOy к оси OD вертолет совершает вертикальный подъем, а при других углах между ними создаются не только вертикальное, но и горизонтальное перемещения.

Однако изменения положения плоскости xOy лопастей несущего винта могут возникнуть и помимо желания летчика из-за порывов ветра и других возмущающих факторов, описанных в § 32. Раскачивая корпус вертолета, а вместе с ним и приводной вал E, эти возмущения будут изменять положение плоскости xOy лопастей винта относительно горизонта, вызывая тем самым нарушение режима полета.

Для предотвращения указанного недостатка может быть использован *управляющий гироскоп* [85], представляющий собой кольцо HK, осевой момент инерции которого увеличен жестко закрепленными на нем грузами Q. Кольцо HK с помощью карданова кольца BK, шарнирно закреплено на приводном валу E.

Благодаря такому креплению вал E при вращении вокруг оси OD увлекает за собой не только лопасти несущего винта, но и кольцо HK. Последнее приобретает при этом большой кинетический момент и становится гироскопом. Вот почему при отклонении оси OD вала E от вертикали, когда плоскость xOy лопастей винта приобретает наклон относительно горизонта, кольцо HK сохранит свое положение в пространстве. При этом оба кольца HK и BK получат перекосы относительно вала E и с помощью шарнирных тяг f вызовут повороты лопастей несущего винта вокруг осей Ox и Oy на углы соответствующих величин и направлений.

Возникающий в этом случае аэродинамический момент и восстановит нарушенное положение летательного аппарата. Как видим, управляющий гироскоп вертолета обеспечивает стабилизацию последнего относительно плоскости горизонта, заменяя собой сложную систему автопилота.

VI

ГИРОСКОП НА ТРАНСПОРТЕ

34

Двухколесный автомобиль

Одним из ранних примеров практического использования гироскопического эффекта в самодвижущихся экипажах является обычный двухколесный велосипед. При езде на нем гироскопический эффект быстро вращающихся колес используется для обеспечения устойчивости движения и для управления направлением движения велосипеда.

Устойчивость, приобретаемая движущимся двухколесным велосипедом, натолкнула нашего соотечественника П. П. Шиловского на мысль о создании двухколесного автомобиля. Эта идея была успешно разрешена [40], и двухколесный автомобиль в 1914 г. появился на улицах Лондона (рис. 107), привлекая к себе внимание жителей города. На первый взгляд казалось, что никаких особых устройств в двухколесном автомобиле нет, и его устойчивое вертикальное положение сохраняется, так же как и у велосипеда, только во время движения. Однако автомобиль Шиловского останавливался, в него садились и из него выходили пассажиры, и все же машина сохраняла вертикальное положение, стоя только на двух колесах.

В чем же заключался секрет столь необычайного поведения двухколесного автомобиля? Оказывается, пора-



Рис. 107. Двухколесный автомобиль.

жавший зрителей экипаж был снабжен гироскопом, который обеспечивал его устойчивость не только во время движения, но и при остановках. Конструктивно это гироскопическое устройство представляло собой массивный ротор, вращающийся с большой угловой скоростью Ω вокруг оси *АА* в раме *ВК* (рис. 108) и обладающий относительно оси *АА* моментом инерции *J*. В свою очередь рама *ВК* была смонтирована на подшипниках в кронштейнах, жестко укрепленных на днище кузова автомобиля. Тем самым раме совместно с ротором гироскопа обеспечивалась возможность вращения вокруг оси *ВВ*. Поворот же гироскопа вокруг третьей оси *СС* мог происходить лишь совместно с корпусом машины.

Рама *ВК* гироскопа через зубчатую передачу была связана со специальным приводом, который для упрощения представим в виде электрического двигателя *ЭД*, управляемого маятниковым переключателем *П*, расположенным своей продольной осью параллельно оси *ВВ*. При посадке пассажиров или при их перемещениях внутри автомобиля

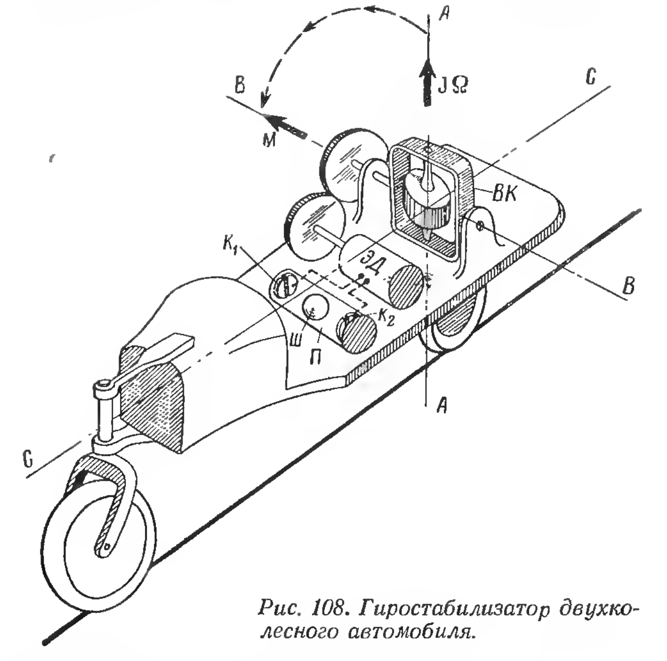


Рис. 108. Гиростабилизатор двухколесного автомобиля.

во время его движения корпус машины может отклониться от вертикали в результате поворота вокруг продольной оси *CC*. Но при этом металлический шар *Ш*, являющийся маятником, аналогичным описанному выше креномеру (см. рис. 89 и 93), сместится с нейтрального положения, перекатится внутри корпуса переключателя *П* в сторону наклона автомобиля и замкнет одну из двух пар управляющих контактов: K_1 или K_2.

Если внешнее возмущение вызовет наклон автомобиля на левый бок, то шар *Ш* переключателя *П* замкнет контакты K_2. Включенный таким образом двигатель *ЭД* обеспечит воздействие на гироскоп момента *M*, вектор которого будет направлен по оси *BB* в сторону правого борта



Рис. 109. Модель двухколесного автомобиля 1961 г.

автомобиля, как это и показано на рис. 108. Под действием момента M гироскоп, а вместе с ним и кузов автомобиля получат, согласно изложенному в § 11, прецессионное движение вокруг продольной оси CC машины, при котором вектор кинетического момента $J\Omega$ гироскопа будет стремиться прийти к совмещению с вектором момента M по кратчайшему расстоянию.

В результате прецессионного движения кузов автомобиля начнет выравнивать свое положение, уменьшая угол наклона к горизонту. Угловая скорость такого выравнивающего движения, согласно равенству (7), будет тем больше, чем больший момент M воздействует на гироскоп, обладающий кинетическим моментом $J\Omega$. Когда экипаж возвратится в горизонтальное положение, шар переключателя $П$ разомкнет управляющие контакты, и действие на гироскоп момента M, а тем самым и поворот автомобиля вокруг его продольной оси CC прекратятся. В таком положении автомобиль будет находиться до тех пор, пока новое возмущение не вызовет нового наклона машины. Описанная работа гироскопического стабилизатора повторится вновь, и горизонтальное положение экипажа опять будет восстановлено. Таков в кратких чертах принцип работы гироскопического стабилизатора, обеспечивающего

устойчивость двухколесного автомобиля как при движении, так и во время остановок.

Уже первые поездки по улицам Лондона доказали простоту устройства двухколесного автомобиля и возможность его практического использования даже в условиях городского движения. Но начавшаяся в 1914 г. первая мировая война не позволила П. П. Шиловскому продолжить работу по усовершенствованию двухколесного автомобиля. Постепенно его идея была забыта, и только по прошествии почти полувека к ней вновь обратились автомобилестроители. Так, на международной автомобильной выставке 1961 г. уже демонстрировалась модель (рис. 109) нового двухколесного автомобиля [114], а в 1967 г. прошли испытания его первых образцов [149].

Так же как и в автомобиле Шиловского, горизонтальное положение современного двухколесного автомобиля при его движении стабилизировалось гироскопом, размещенным под капотом в передней части машины (рис. 110). Ротор гироскопа диаметром 60 *см* вращается вокруг своей главной оси, расположенной вертикально, со скоростью около 6000 оборотов в минуту. Наличие двух колес вместо четырех и совершенная аэродинамическая форма кузова (рис. 111) резко снижают сопротивление воздуха и дорожного покрытия. Новый автомобиль с двигателем мощностью 80 *л. с.* развивает скорость до 140 *км/ч*.

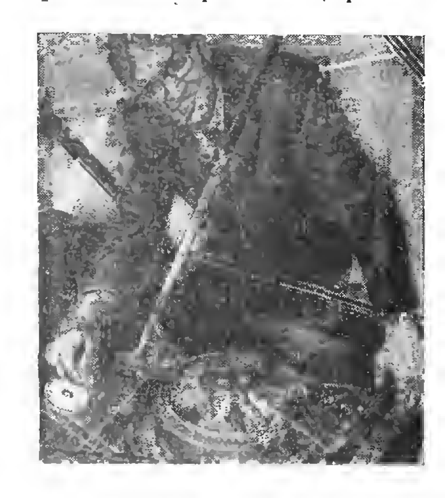


Рис. 110. Размещение гироскопа на двухколесном автомобиле.



Рис. 111. Двухколесный автомобиль Гирон-X.

Описываемый автомобиль, получивший происходящее от гироскопа название «гирон», оборудован расположенными в задней части кузова двумя малыми вспомогательными колесами, автоматически выдвигающимися из машины при уменьшении ее скорости ниже 5 *км/ч*. Эти вспомогательные колеса поддерживают автомобиль на стоянке, когда ротор гироскопа не имеет вращения. Новый автомобиль, как пишут специалисты [81, 84, 122], найдет себе применение для доставки материалов и изделий при строительстве тех или иных объектов в труднодоступных горных районах. Опыты показывают, что двухколесный автомобиль легко проходит по тропинкам, расположенным на косогорах с уклоном до 60°.

35

Однорельсовая железная дорога

За несколько лет до создания двухколесного автомобиля появились попытки построить однорельсовую железную дорогу. Положительное решение указанной проблемы сулило большие экономические выгоды. Уже одно то обстоятельство, что

при строительстве однорельсовой железной дороги требовалось прокладывать только один рельс вместо двух, позволяло почти вдвое сократить расходы на сооружение полотна. Тем самым при одних и тех же затратах можно было бы вдвое увеличить протяженность железнодорожных путей сообщения по сравнению со строительством обычного двухрельсового полотна.

Указанные перспективы использования однорельсовых железных дорог вызвали появление различных проектов вагонов, сохраняющих устойчивость при движении по одному рельсу. Примерно в 1909 г. почти одновременно появились однорельсовые гироскопические вагоны русского инженера П. П. Шиловского, англичанина Л. Бренана и немца А. Шерля. По принципу устройства гироскопические стабилизаторы однорельсовых вагонов напоминают гироскопический стабилизатор двухколесного автомобиля.

В однорельсовых вагонах используются два варианта размещения гироскопического стабилизатора: в первом главная ось гироскопа расположена вертикально и система стабилизации работает так же, как и в двухколесном автомобиле, а во втором варианте главная ось гироскопа размещается на платформе горизонтально и перпендикулярно к продольной оси вагона [53].

По второму варианту был изготовлен гироскопический стабилизатор однорельсового вагона Бренана. Массивный ротор монтировался на подшипниках в раме *BK* (рис. 112), благодаря чему ему обеспечивалась свобода вращения вокруг оси *AA*, которая выдерживалась параллельной днищу вагона перпендикулярно к его продольной оси *CC*. Рама *BK* устанавливалась на подшипниках в станине *K*, жестко закрепленной в корпусе вагона, причем ось *BB* располагалась вертикально.

Сообщая ротору гироскопа максимально возможную угловую скорость Ω вращения вокруг оси *AA*, получали систему, движение которой подчинялось основному закону прецессии (см. § 11). Для воздействия на гироскоп внеш-

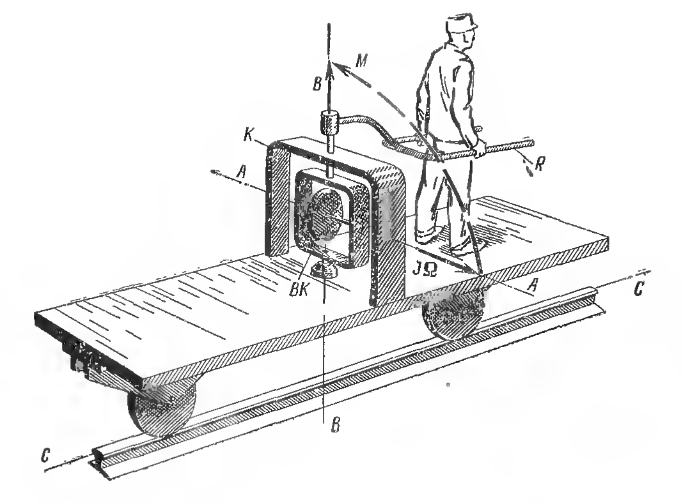


Рис. 112. Стабилизатор однорельсового вагона.

ним моментом рама BK была снабжена рукояткой R. При наклоне вагона на правый борт по ходу его движения водитель нажимал на рукоятку R, стремясь повернуть ее влево. Тем самым создавался действующий на гироскоп относительно оси BB момент M, направленный против часовой стрелки, если смотреть на платформу сверху. Под влиянием момента M гироскоп, обладающий кинетическим моментом $J\Omega$, получит, как известно (см. § 11), прецессионное движение вокруг продольной оси CC вагона, в процессе которого его ось AA будет по кратчайшему пути идти на совмещение с вектором момента M.

В связи с тем, что станина K гироскопа жестко связана с корпусом вагона, последний будет участвовать в прецессии гироскопа. В результате этого движения наклон вагона начнет уменьшаться, и в тот момент, когда платформа придет в горизонтальное положение, водитель пре-

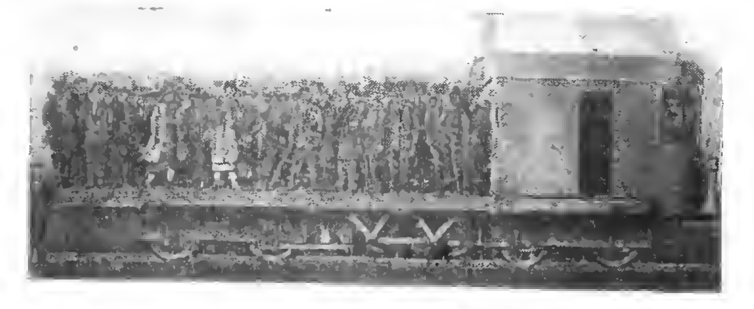


Рис. 113. Однорельсовый вагон.

кращает давить на рукоятку R. Описанная схема гироскопического стабилизатора была осуществлена в однорельсовом вагоне, построенном для англо-японской выставки 1912 г. в Лондоне [140]. Такой вагон (рис. 113) вмещал

Рис. 114. Однорельсовый вагон в движении.



Рис. 115. Однорельсовая дорога 1966 г.

одновременно до 40 человек. На нем перевозили по территории выставки многочисленных посетителей (рис. 114), проявлявших живой интерес к необыкновенной железной дороге.

Так же как и двухколесные автомобили, однорельсовая железная дорога долгое время не получала развития. Начавшаяся первая мировая война 1913—1918 гг. отнимала все средства на военные расходы, не позволяя проводить усовершенствования, необходимые для использования однорельсовой железной дороги для массовых регулярных перевозок.

У нас в Советском Союзе в 1922 г. был закончен проект постройки на участке Ленинград — Гатчина однорельсовой железной дороги системы Шиловского [40]. Но молодому социалистическому государству требовались большие средства для выполнения первоочередных, самых необходимых мероприятий по восстановлению разрушенного войнами народного хозяйства, поэтому проект однорельсовой железной дороги так и не был осуществлен в те годы.

Разговоры об однорельсовых гироскопических дорогах надолго прекратились, и только в 1966 г. во Франции появился участок пути однорельсовой дороги (рис. 115), по которой вагоны движутся со скоростью, превышающей 130 *км/ч* [72]. Вагон новой однорельсовой дороги опирается на воздушную подушку, создаваемую мощными насосами

между его корпусом и железобетонным рельсом. Движение вагона осуществляется воздушным винтом авиационного двигателя, расположенного над крышей вагона.

36

Гироскопические успокоители качки автомобиля и коляски мотоцикла

Автомобиль наряду с его общеизвестными преимуществами имеет и существенный недостаток, заключающийся в хаотической качке его кузова, вызываемой во время движения неровностями пути. Качка автомобиля отлична от более или менее ритмичной качки движущегося железнодорожного вагона или корабля на волнении и поэтому приводит к быстрому утомлению пассажиров.

Вот почему одновременно с промышленным освоением автомобиля конструкторская мысль искала пути повышения комфортабельности его подвески. Были введены шины низкого давления, осуществлена независимая подвеска колес, листовые рессоры заменены более совершенными спиральными пружинами и торсионными стержнями, поставлены амортизаторы и т. п. Все эти усовершенствования позволили создать автомобиль высокого класса, однако даже его лучшие образцы при езде по посредственным дорогам приобретали настолько значительные колебания, что для их уменьшения приходилось резко снижать скорость движения.

Нужна была подвеска, которая гасила бы толчки, воспринимаемые автомобилем при езде на больших скоростях по плохой дороге. И решение этой проблемы было найдено опять-таки с помощью гироскопа.

В 1926 г. в Германии был предложен успокоитель качки автомобиля [141], состоящий из двух установленных на его

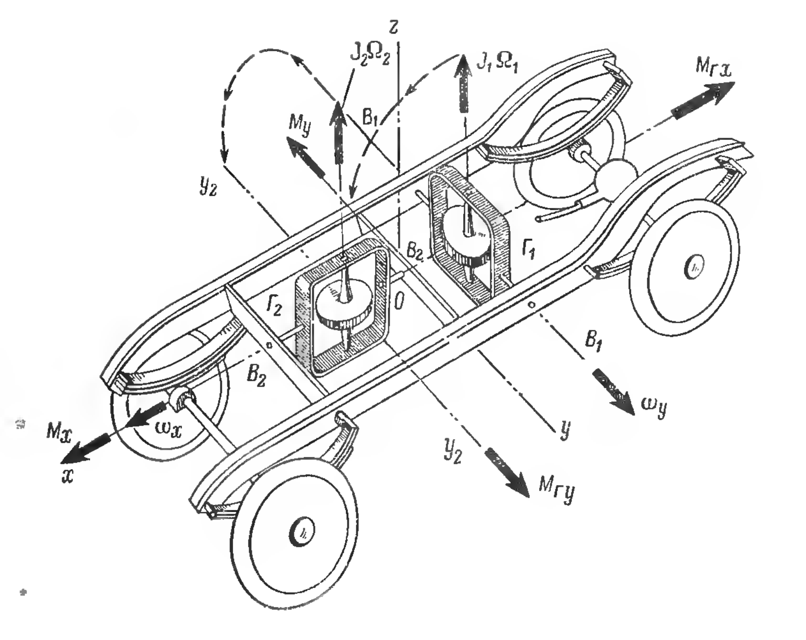


Рис. 116. Гироскопический успокоитель качки автомобиля.

раме гироскопов $Г_1$ и $Г_2$ с вертикальными главными осями (рис. 116). Каждый из них по отношению к раме автомобиля обладал двумя, а по отношению к колесам, благодаря наличию рессор, тремя степенями свободы. При этом ось B_1B_1 подвеса гироскопа $Г_1$ располагалась параллельно поперечной оси Oy автомобиля, а ось B_2B_2 гироскопа $Г_2$ параллельно его продольной оси Ox.

Автомобиль, оборудованный данным гироскопическим успокоителем, в меньшей степени, чем обычный, подвержен качке даже при езде по дороге с большими неровностями. Действительно, предположим, что передние колеса автомобиля, наскакивая на препятствие, восприняли удар,

который через рессоры тотчас же передастся раме в виде мгновенного момента M_y, стремящегося повернуть машину вокруг оси Oy в направлении по часовой стрелке. Однако гироскоп $Г_2$, обладающий кинетическим моментом $J_2\Omega_2$, из-за своей инертности не переместится в направлении действия момента M_y, а, сопротивляясь ему, начнет прецессировать вокруг оси Ox автомобиля. В результате его главная ось будет ближайшим путем идти на совмещение с проекцией на ось y_2y_2 вектора момента M_y со скоростью, согласно формуле (7), равной

$$\omega_x = \frac{M_y}{J_2\Omega_2}.$$

Но как только гироскоп, вращающийся вокруг своей главной оси с угловой скоростью Ω_2, получит одновременное вращение еще и вокруг оси Ox с угловой скоростью ω_x, возникнет момент гироскопической реакции $M_{гy}$, который в данном случае действует относительно оси y_2y_2. Его направление противоположно действию внешнего момента M_y, а величина, согласно формуле (3), равна

$$M_{гy} = J_2\Omega_2\omega_x.$$

Если в последнее равенство подставить значение скорости ω_x

$$M_{гy} = J_2\Omega_2\omega_x = J_2\Omega_2\frac{M_y}{J_2\Omega_2} = M_y,$$

то нетрудно убедиться, что гироскопический момент $M_{гy}$ уравновешивает внешний возмущающий момент M_y. Как видим, удар, передаваемый через рессоры на раму автомобиля, будет погашен инерцией гироскопа $Г_2$, благодаря чему кузов машины сохранит горизонтальное положение.

При наезде автомобиля на возвышение левой стороны дороги его рама воспримет мгновенный момент M_x, стремящийся повернуть ее вокруг оси Ox. Под влиянием

момента M_x возникает прецессия гироскопа $Г_1$ вокруг оси B_1B_1 с угловой скоростью

$$\omega_y = \frac{M_x}{J_1\Omega_1}.$$

В связи с появлением скорости ω_y у гироскопа $Г_1$ возникнет момент гироскопической реакции

$$M_{гx} = J_1\Omega_1\omega_y = J_1\Omega_1 \frac{M_x}{J_1\Omega_1} = M_x,$$

который и уравновесит внешний момент, действующий относительно оси Ox автомобиля.

В конструкции гироскопов предусмотрены ограничители их поворота вокруг осей B_1B_1 и B_2B_2. Но в связи с непрерывным изменением действия возмущающих моментов M_x и M_y гироскопы ложатся на эти упоры лишь в исключительных случаях. Поэтому гироскопы, вес которых не превышает 1—2% от веса автомобиля, обеспечивают сохранение горизонтального положения кузова машины даже при езде по неровной дороге, что особенно важно для санитарных машин, перевозящих больных по полевым и проселочным дорогам.

Наряду с проблемой стабилизации кузова автомобиля возникла необходимость стабилизации для тех же целей и коляски мотоцикла. Над решением этой задачи работал советский ученый Р. В. Роттенберг, который провел не только теоретические исследования в этой области, но получил и практические результаты [129]. По идее автора гироскоп с двумя степенями свободы устанавливался в коляске мотоцикла таким образом, чтобы его главная ось AA была в первоначальном положении вертикальна, а ось подвеса BB совмещена с продольной осью коляски (рис. 117).

Предположим, что мотоцикл с коляской, оборудованной гироскопическим стабилизатором, при движении попал передним колесом в выбоину на дороге. Проваливаясь в нее,

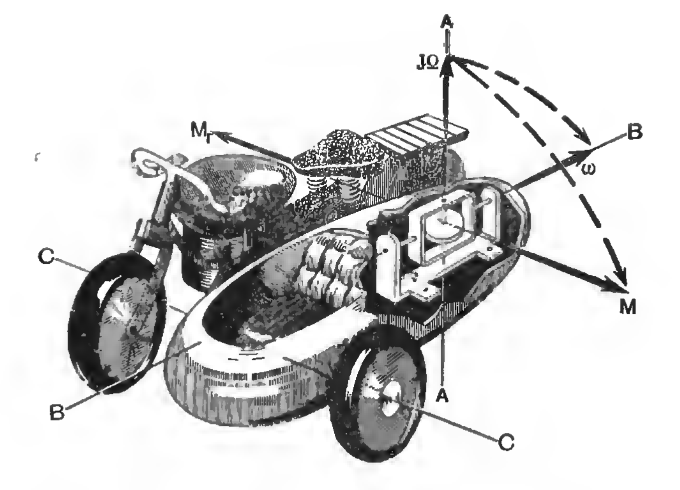


Рис. 117. Гироскопический успокоитель качки коляски мотоцикла.

мотоцикл, действуя своим весом на коляску, создает некоторый момент M, стремящийся повернуть ее вокруг поперечной оси. Как и в стабилизаторе автомобиля, гироскоп, смонтированный в коляске мотоцикла, под влиянием момента M начнет прецессировать вокруг оси BB с угловой скоростью $\omega = \frac{M}{J\Omega}$. Возникающий при этом гироскопический момент

$$M_г = J\Omega\omega = J\Omega \frac{M}{J\Omega} = M$$

уравновесит собой воздействующий на коляску мотоцикла внешний возмущающий момент M, обеспечивая ее стабилизацию относительно поперечной оси CC.

Экспериментальные кривые (рис. 118) угловых колебаний коляски мотоцикла, записанные во время ходовых

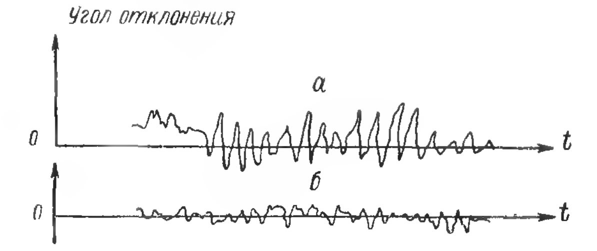


Рис. 118. Графики колебаний коляски мотоцикла при движении по булыжной мостовой со скоростью 35 км/ч при выключенном (а) и включенном (б) гиростабилизаторе.

испытаний, убедительно показывают, насколько эффективно сказывается наличие гироскопического стабилизатора на успокоение колебаний мототранспорта при езде его по неровным дорогам.

37

Гиробус

Рассмотренные примеры гироскопической стабилизации корабля, двухколесного автомобиля, вагона однорельсовой железной дороги, кузова автомобиля и коляски мотоцикла показывают, каким колоссальным резервуаром энергии является быстро вращающийся ротор гироскопа. Запасенной им энергии хватает для выдерживания в горизонтальном положении перечисленных подвижных объектов, несмотря на непрерывно действующие на них внешние возмущения. При этом интересно отметить, что габариты ротора гироскопа достаточно малы по сравнению с размерами стабилизируемых объектов.

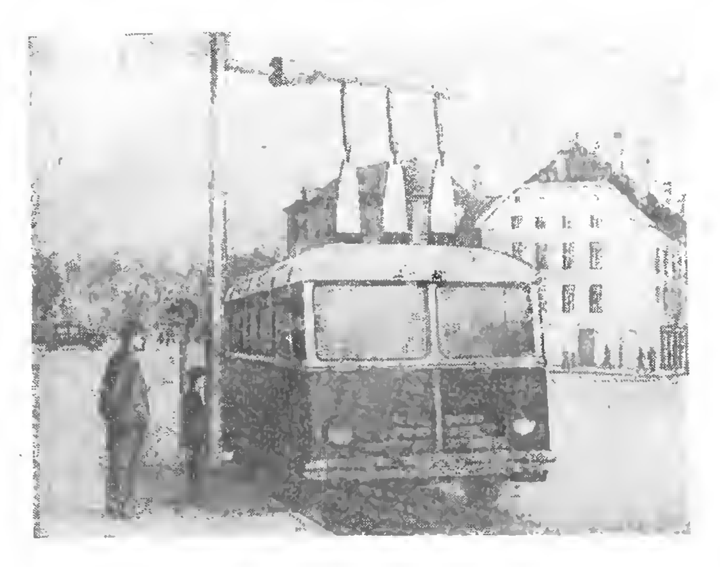


Рис. 119. Гиробус.

Конструкторы давно искали путей для практического использования быстро вращающихся тел в качестве аккумулятора энергии. И трудами ученых и специалистов многих отраслей техники такая возможность была найдена. Так, в начале 1956 г. на улицах некоторых швейцарских городов появился необычайный транспорт [90, 91]. Это не были привычные для нас автобусы или троллейбусы. Пока экипаж двигался между остановками, он был похож на автобус, хотя никакого выхлопа отработанных газов от его двигателя не замечалось. Зато на остановках над крышей машины подымались три штанги (рис. 119), и он становился похожим на троллейбус.

Как оказалось, на необычайной машине, получившей название гиробус, был установлен массивный ротор, изготовленный из стали высокой прочности. Его диаметр

был равен 1,5 *м*, а вес достигал 1,5 *т*. На определенных остановках, расположенных друг от друга на расстоянии 5—6 *км*, когда штанги подключались к контактам, смонтированным на специальном столбе, на электрический двигатель, установленный внутри машины и соединенный жестко с ротором, подавался ток от городской сети. Ротор начинал быстро раскручиваться и примерно за одну минуту набирал скорость, равную 3000 *об/мин*. Как только гиробус начинал двигаться, штанги автоматически отключались, и движение машины осуществлялось только за счет запасенной ротором на стоянке энергии. Для более экономичного расходования энергии быстро вращающегося ротора последний заключен в герметический кожух, заполненный водородом под давлением 0,7 *атм*. Тем самым улучшалось охлаждение и снижались потери энергии на преодоление ротором сил трения, возникающих при его вращении в окружающей среде.

После того как питание электродвигателя прекращалось, ротор по инерции продолжал вращать вал двигателя, работающего теперь уже как генератор. Вырабатываемая им электрическая энергия подавалась на электрические двигатели, вращающие колеса гиробуса. Энергии, запасенной ротором за время стоянки, было вполне достаточно, чтобы гиробус проехал с полной нагрузкой девять километров, развивая при этом скорость 60 *км/ч*.

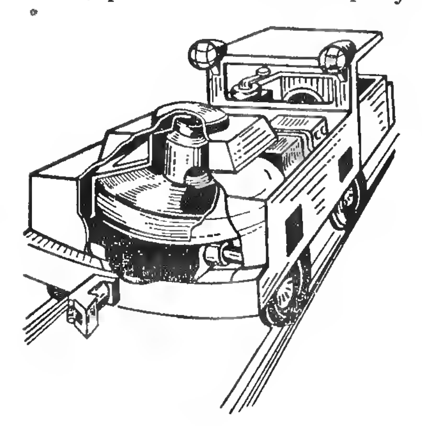


Рис. 120. Гировоз.

У нас в Советском Союзе гиробусы, а вернее сказать, гировозы, получили распространение на подземных железных дорогах в шахтах

[142]. Учитывая необходимость обеспечения взрывобезопасности, ротор такого гировоза раскручивают на зарядной станции пневматическим двигателем. Через 3—4 *сек* после того, как ротору будет сообщено вращение со скоростью 3000 *об/мин*, пневмодвигатель отключается и к ротору через муфту сцепления присоединяется редуктор, передающий вращение на ведущие колеса гировоза. Чтобы избежать опрокидывания экипажа на закруглениях пути, главная ось гироскопа располагается вертикально, как это и показано на рис. 120.

VII

ГИРОСКОП В ГОРНОМ ДЕЛЕ

38

Необходимость в приборах, обеспечивающих быстрое исследование природных богатств

Изучение внутреннего строения Земли и процессов, совершающихся в глубинах ее недр, так же как и освоение космоса, издавна привлекало внимание человека. Между тем наши познания в этом вопросе все еще весьма малы. Уже на глубине 10—15 *км* от земной поверхности начинается область, о строении которой имеются только предположения.

В то же время задачи, стоящие перед нашим социалистическим обществом, требуют все возрастающего по своим масштабам снабжения бурно развивающейся промышленности металлом, углем, нефтью, газом и другими природными богатствами. Чтобы правильно, научно планировать развитие всех областей народного хозяйства, необходимо в первую очередь иметь четкие данные о запасах природных богатств, находящихся в недрах Земли, на ее поверхности и в водах рек, морей и океанов.

За годы Советской власти наша страна вышла на первое место в мире по разведыванию запасов многих видов полезных ископаемых. В СССР за это время открыты такие крупнейшие каменноугольные бассейны, как Кузбас, Караганда, Печора и им подобные. В районах Курской магнитной аномалии было открыто уникальное месторождение железной руды, занимающее одно из первых мест

в мире. Благодаря труду геологов народное хозяйство Советского Союза обеспечено большими запасами самых разнообразных полезных ископаемых.

В настоящее время ведутся работы по составлению геологической карты Советского Союза, на основе которой будет планироваться развитие промышленности будущего коммунистического общества. Для форсирования подготовки такой карты необходимо ускорение геологических изысканий, что требует создания новых приборов, обеспечивающих автоматизацию производства и контроля разведывательных работ.

В процессе решения проблемы отечественная приборостроительная промышленность создала большое количество дистанционной аппаратуры для геофизических исследований и целый ряд автоматических устройств, ускоряющих геологические поиски. В общем их комплексе все большее значение начинают приобретать гироскопические приборы. Уже сейчас на вооружении геологов имеются и гироскопические инклинометры для контроля кривизны буровых скважин, и гироскопические стабилизаторы магнитометров, и маркшейдерские гироскопические компасы для подземного ориентирования шахт по частям света, и многие другие системы.

Внедрению гироскопа в геологические и геофизические приборы активно содействовали своими работами советские ученые и инженеры Б. И. Никифоров, Б. К. Викулин, А. З. Туниманов, В. Н. Лавров, В. В. Шатихин, П. А. Ильин, И. Я. Стариков, А. И. Королев, М. А. Сергеев и др. Благодаря их трудам гироскопические приборы для геологических изысканий и геофизических исследований вышли из стадии опытных разработок и изготовляются сейчас промышленностью. Естественно, что быстрому внедрению гироскопа в геологические приборы во многом способствовало использование конструкторского и технологического опыта производства гироскопических приборов, накопленного в морском и авиационном приборостроении.

39

Гироскопический инклинометр

Наиболее достоверные сведения о запасах полезных ископаемых можно получить в результате проведения разведывательных работ методом бурения скважин. С этой целью в районе, предназначенном для исследования, в нескольких точках выбранной площади производят бурение скважин, из которых на разной глубине берут для анализа пробы грунта. Однако вследствие различной твердости пород, через которые проходит скважина, ее ось, как правило, отклоняется от запроектированного направления.

Искривление скважины, вызывая усложнение работ, не позволяет составить правильного суждения о количестве запасов полезных ископаемых данного района. Предположим, что при бурении скважины (рис. 121) сверло наткнулось на гранитный валун K и из-за этого отклонилось от запроектированного направления ZZ. Дальнейшее углубление скважины будет производиться теперь вдоль прямой CD, и вынутые из нее пробы грунта не будут включать в себя породы пласта M, содержащего полезные ископаемые.

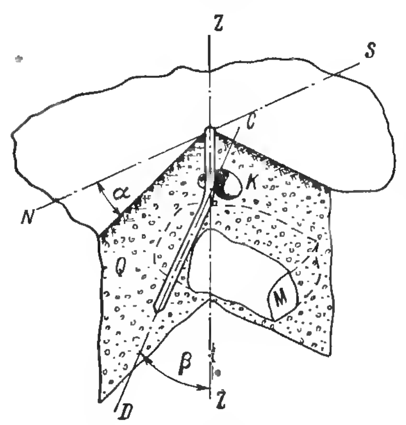


Рис. 121. Искривление буровой скважины.

Техническая мысль настойчиво искала методы контроля направления буровых скважин. Сложность проблемы заключалась в том, что искривление скважины могло происходить под произвольным углом β к вер-

тикали ZZ, причем плоскость Q этого искривления могла быть расположена под любым углом α к меридиану NS.

Поэтому для составления суждения о характере искривления скважины необходимо было знать значения обоих углов: α и β. Для их измерения было создано много приборов, называемых инклинометрами, в основе которых лежало использование магнитной стрелки и маятника. Но они не могли в полной мере удовлетворить возросшим требованиям современных задач, так как магнитная стрелка, реагируя на залежи железных масс, искажала действительную величину угла α. Кроме того, требовалось значительное время выдержки прибора в неподвижном положении для успокоения колебаний магнитной стрелки и маятника. Все это удлиняло контроль и не позволяло производить его автоматически по всей глубине скважины.

Вот почему приборостроители при решении данной проблемы обратились к свойствам гироскопа. В Советском Союзе, Чехословакии и других странах появились гироскопические инклинометры, из которых лучшие результаты показал советский гироинклинометр завода «Геологоразведка».

Измерительное устройство указанного прибора (рис. 122) состоит из гироскопа направления *ГН*, аналогичного рассмотренному в § 28, и уровня *ГУ*, являющегося также гироскопом с тремя степенями свободы. Ось *AA* гироскопа *ГУ* принудительно приводится к совмещению с плоскостью искривления скважины. Для этого на его наружном кольце *НК* установлен ртутный маятниковый переключатель L_1. До тех пор пока кольцо *НК* не установится перпендикулярно к плоскости Q искривления скважины (рис. 121), ртуть переключателя L_1 (рис. 122) замыкает один из его контактов, подавая ток на электродвигатель $ЭД_1$. Последний создает в этом случае момент M_B, действующий на гироскоп *ГУ* относительно оси *BB*, порождая тем самым его прецессию вокруг оси *CC*. В результате главная ось *AA* гироскопа *ГУ* пойдет на совмещение с пло-

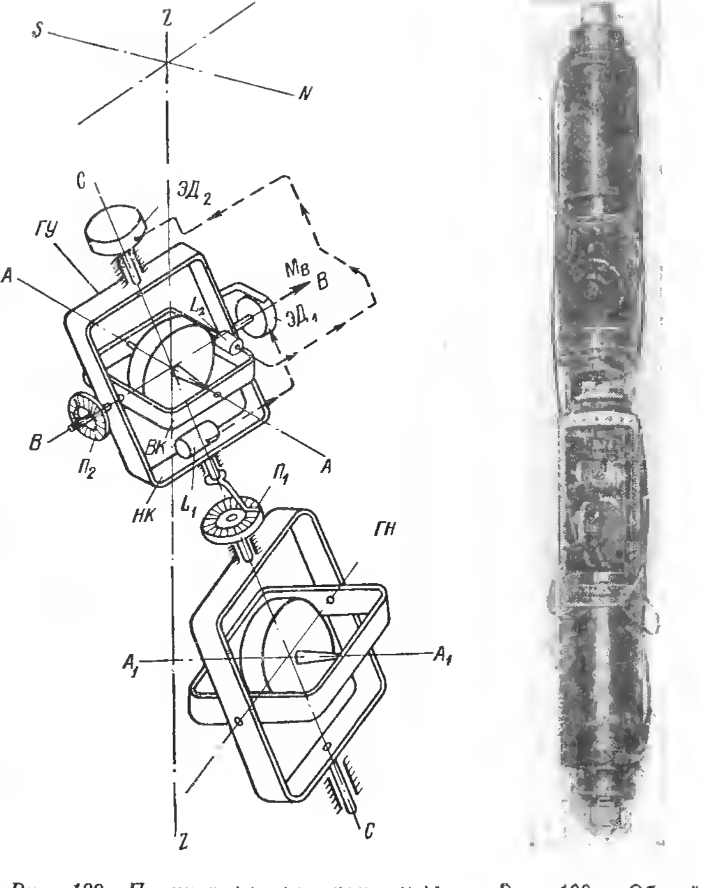


Рис. 122. Принципиальная схема гироинклинометра.

Рис. 123 Общий вид гироинклинометра.

скостью искривления скважины. И как только это совмещение произойдет, переключатель L_1 примет горизонтальное положение, и ток в цепи электродвигателя $ЭД_1$ прервется.

Ось A_1A_1 гироскопа направления $ГН$ предварительно совмещается с плоскостью меридиана. Поэтому угол между плоскостями, проходящими через ось CC и оси AA и A_1A_1 обоих гироскопов, будет характеризовать угол α (рис. 121), составляемый плоскостью Q искривления скважины с меридианом NS. Его величина определяется по напряжению, снимаемому с потенциометра $П_1$ (рис. 122), установленного на наружном кольце гироскопа $ГН$.

Ось AA гироскопа $ГУ$ одновременно с приведением ее в плоскость искривления скважины совмещают еще и с плоскостью горизонта. Для этого на внутреннем кольце $ВК$ смонтирован переключатель L_2, ртуть которого при наклоне оси AA замыкает один из двух контактов, подавая ток соответствующего направления на электродвигатель $ЭД_2$. Последний создает относительно оси CC момент, который и заставит гироскоп $ГУ$, прецессируя вокруг оси BB, привести свою ось AA к совмещению с горизонтом.

Благодаря совмещению оси CC гироскопа $ГУ$ с осью скважины, а оси BB — с плоскостью ее искривления, по углу между плоскостями наружного $НК$ и внутреннего $ВК$ колец подвеса можно судить об угле β (рис. 121) наклона скважины к горизонту. Его величина определится напряжением, снимаемым с потенциометра $П_2$, установленного по внутренней оси BB гироскопа $ГУ$. Такова в принципе схема работы гироскопического инклинометра, конструкция измерительной части которого показана на рис. 123.

Замена магнитной стрелки и маятника гироскопами позволила избежать воздействия на инклинометр магнитных полей. Благодаря применению гироскопического инклинометра удается быстро и непрерывно контролировать кривизну скважины и автоматически записывать изменения углов α и β по всей ее глубине.

Гироскопический стабилизатор магнитометра

Наша Земля является естественным магнитом, в поле которого находится все на ней живущее. Полюсы N_m и S_m этого магнита (рис. 124) не совмещены с географическими полюсами N и S Земли и поэтому плоскости магнитного и географического меридианов не совпадают друг с другом. Угол между плоскостями обоих меридианов, называемый углом магнитного склонения, и угол магнитного наклонения, составляемый вектором напряженности магнитного поля Земли с горизонтом, в каждом пункте земной поверхности различны по величине и направлению. Однако эти величины подчиняются определенной закономерности, согласно которой и составляются магнитные карты.

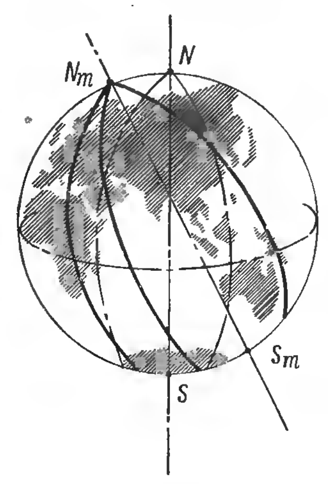


Рис. 124. Положения магнитных меридианов на земной поверхности.

Указанная закономерность в некоторых случаях нарушается магнитными аномалиями, свидетельствуя о залежах в недрах данного района железных руд. Для измерения углов склонения и наклонения, или так называемых параметров магнитного поля Земли, применяются специальные приборы, называемые магнитометрами. Они состоят из трех феррозондов *З*, установленных взаимно перпендикулярно на площадке *П* (рис. 125).

Каждый феррозонд представляет собой пермаллоевый сердечник (рис. 126), в центральной части которого расположена первичная электрообмотка *ПО*, питаемая переменным током напряжением U_1. На концы сердечника *С* намотана вторичная обмотка *ВО*. Магнитный поток, возбуждаемый первичной обмоткой *ПО*, в каждой половине сердечника *С* имеет взаимно противоположные направления и поэтому не наводит электродвижущей силы во вторичной обмотке *ВО*.

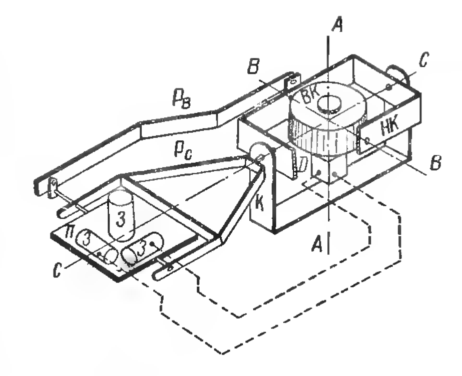


Рис. 125. Гироскопический стабилизатор магнитометра.

Указанный поток за каждый период изменения направления переменного тока в обмотке *ПО* дважды насыщает обе половины сердечника *С*, изменяя тем самым и его магнитную проницаемость. Вследствие периодического изменения магнитной проницаемости магнитное поле Земли будет создавать в сердечнике пульсирующий поток, направленный в обеих половинах сердечника одинаково, благодаря чему на вторичной обмотке *ВО* возникает напряжение U_2. Это напряжение будет максимальным при совмещении продольной оси *аа* сердечника *С* с направлением вектора напряженности магнитного поля Земли и равным нулю при перпендикулярном положении между указанными направлениями.

Основной феррозонд, установленный на площадке *П* (рис. 125) перпендикулярно, предназначен для измерения полного вектора напряженности. Два других дополнительных феррозонда, расположенных взаимно перпендикулярно и перпендикулярно к основному феррозонду, измеряют со-

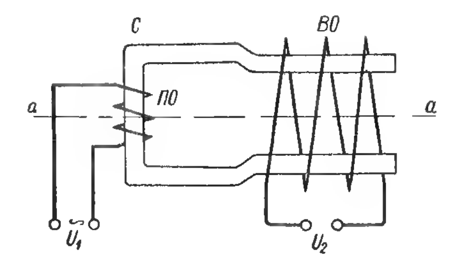


Рис. 126. Принцип устройства феррозонда.

ставляющие при несовпадении оси основного зонда с полным вектором напряженности магнитного поля Земли.

Электрические сигналы, поступающие с дополнительных зондов, показывают, что ось основного зонда не совмещена с вектором напряженности магнитного поля. Поворачивая площадку *П* относительно горизонта, добиваются отсутствия сигналов дополнительных зондов и совмещения оси основного зонда с вектором напряженности магнитного поля Земли.

Такое ориентирование площадки *П* несложно выполнить на неподвижном относительно Земли основании. Однако геологические изыскания в заданном районе при таком методе измерения будут продолжаться весьма долго, так как потребуется много времени для транспортировки прибора от одной выбранной точки измерения до другой.

Время геологического исследования района можно значительно сократить, устанавливая магнитометр на самолете. Но для этого необходимо, чтобы площадка *П* сохраняла неизменно перпендикулярное положение по отношению к направлению вектора напряженности магнитного поля Земли. Стабилизация этого положения и осуществляется с помощью гироскопа, ротор которого вращается вокруг оси *АА* в гирокамере *ВК*. Последняя монтируется по оси *ВВ* в наружном *НК* кольце подвеса, которое по оси *СС* устанавливается в корпусе *К* прибора. С помощью рычагов P_C и P_B площадка *П* так связана соответственно с наружным кольцом *НК* и камерой *ВК* гироскопа, что его главная ось *АА* всегда остается параллельной продольной оси основного феррозонда.

Сигналы, снимаемые с дополнительных зондов, поступают на устройство *D*, смонтированное на гирокамере *ВК*, с помощью которого создают воздействующие на гироскоп внешние моменты аналогично тому, как это было рассмотрено в § 30 (см. рис. 100). Только управление устройствами, создающими внешние моменты, осуществляется теперь не маятниками, а непосредственно дополнительными феррозондами *З* (рис. 125).

Как только ось основного зонда отклонится от вектора напряженности магнитного поля, так сразу же сигналы, снимаемые с дополнительных феррозондов, поступят на устройство *D*, которое и создаст моменты внешних сил. Под их влиянием у гироскопа возникнет прецессия, в результате которой его ось *АА*, а следовательно, и ось основного зонда начнут возвращаться к совмещению с вектором напряженности магнитного поля Земли. Как только это совмещение произойдет, сигналы, снимаемые с дополнительных зондов, станут равными нулю, и прецессия гироскопа прекратится.

Как видим, гироскопический стабилизатор обеспечивает совмещение своей главной оси АА, а вместе с ней и продольной оси основного феррозонда магнитометра с вектором напряженности магнитного поля Земли. По отклонениям этого вектора от направления, указанного на магнитных картах, и определяют наличие в недрах Земли данного района залежей полезных ископаемых.

41

Маркшейдерский гирокомпас

Использование гироскопа в горном деле не ограничивается приведенными примерами. В настоящее время он получает все большее распространение и при маркшейдерских работах, проводимых для согласования направлений подземных разработок

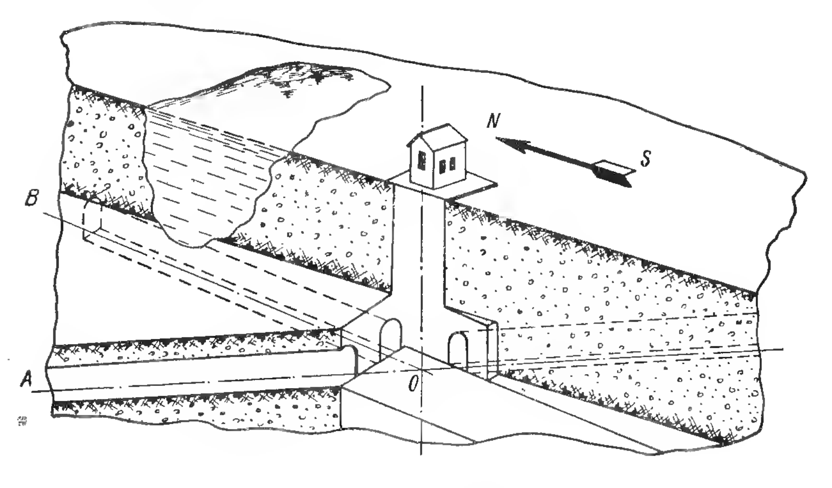


Рис. 127. Схема шахтных подземных разработок.

с рельефом местности и размещением сооружений на земной поверхности.

Представим себе, что в шахте на определенной глубине должен быть прорыт коридор в направлении *OA* (рис. 127), составляющем определенный угол с меридианом *NS*. Если в шахте положение плоскости меридиана будет определено неточно, то разработку коридора произведут не по заданному азимуту *OA*, а по другому направлению *OB*. Указанная ошибка приведет не только к непроизводительным затратам, так как разработка породы в этом случае может пройти вообще мимо пластов, содержащих полезные ископаемые, но подчас и к авариям в шахте.

Если, например, в данном районе находится озеро, то при производстве выработки в ошибочном направлении *OB* можно так близко подойти к его дну, что кровля шахты не выдержит веса воды и разрушится; вода хлынет в выработку и зальет подземные сооружения шахты. Вот почему

к точности определения азимутальных направлений под землей предъявляются высокие требования.

Долгое время перенос направления NS с земной поверхности на дно шахты производился геометрическим способом. На поверхности земли над входным отверстием ствола шахты устанавливали стержень строго в направлении NS. К концам этого стержня на максимально возможном удалении друг от друга, зависящем от диаметра входного отверстия ствола, закреплялись два проволочных отвеса с тяжелыми грузами на концах. Отвесы опускались на всю глубину шахты и на ее дне фиксировались точки местоположения их грузов. Соединяя две эти точки прямой линией, и получали направление меридиана.

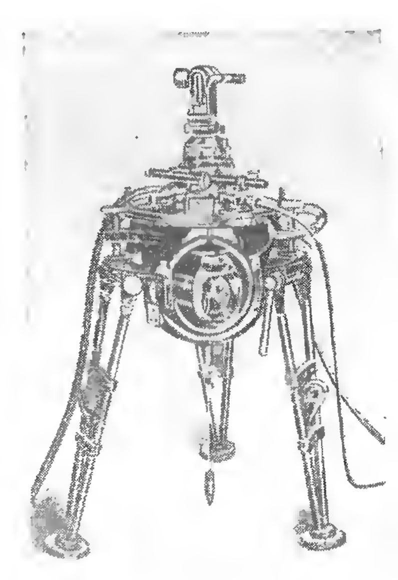


Рис. 128. Маркшейдерский гирокомпас.

Точность описанного метода определения меридиана в шахте резко уменьшалась с увеличением ее глубины. Поэтому в современных условиях, когда шахты опускаются на все более низкие горизонты, геометрический метод не обеспечивает необходимой точности. Кроме того, он требует значительного времени для выполнения всех операций по определению направления меридиана на дне шахты, снижая тем самым ее производительность.

Указанные недостатки геометрического метода заставили маркшейдеров уже на первом своем всероссийском съезде в 1913 г.

поставить вопрос об использовании для целей подземного ориентирования гироскопического компаса. Однако осуществление этой идеи было не под силу промышленности царской России. Только при Советской власти были созданы отечественные образцы маркшейдерских гирокомпасов, показавшие высокую точность работы.

В основе маркшейдерского прибора используются оба типа гироскопических компасов [46]: и морской гирокомпас с тремя степенями свободы (см. § 18), и двухстепенной гирокомпас Фуко (см. § 17). В обоих случаях прибор выполняется конструктивно в малых габаритах, обеспечивающих удобство его транспортировки. Маркшейдерский компас устанавливается обычно на треноге (рис. 128), снабженной отвесом для фиксирования на рабочей площадке местоположения точки подвеса гироскопа. Наружное кольцо гироскопа имеет шкалу, по которой производится определение азимутальных направлений тех или иных выработок в шахте по отношению к плоскости географического меридиана. Для большего удобства пользования прибор снабжен оптическим визиром. Такая конструкция маркшейдерского гирокомпаса удобна при эксплуатации и переноске и не требует остановки работы шахты на время определения в ней плоскости географического меридиана.

VIII

ГИРОСКОП В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

42

Увеличение дальности и точности стрельбы

История войн убедительно показывает, что на протяжении всех времен существования человечества каждая воюющая сторона стремилась нанести противнику как можно бо́льшие потери на максимально возможном удалении от своих жизненных центров. С этой целью люди еще в глубокой древности стали применять пращу, позволявшую забрасывать в стан противника на расстоянии 80—100 *м* камни, являвшиеся первым прототипом боевого снаряда. Затем появились стрелы, копья и дротики, которые не только увеличили дальность стрельбы до 150 *м*, но и повысили точность попадания снаряда в выбранную цель.

В дальнейшем создаются баллисты, катапульты, бриколи и подобные им метательные машины, повысившие дальность стрельбы до 180—200 *м*. Появившиеся в XIII в. первые образцы гладкоствольного огнестрельного оружия — арматы и пищали — позволили увеличить дальность действия боевого оружия до 300 *м*. К началу XVIII в. дальность ружейного огня достигает уже 600 *м*. Примерно в этот же период появляются первые гладкоствольные пушки. В первое время дистанция боевого огня гладкоствольной артиллерии не превышала 1,5 *км*, но уже в се-

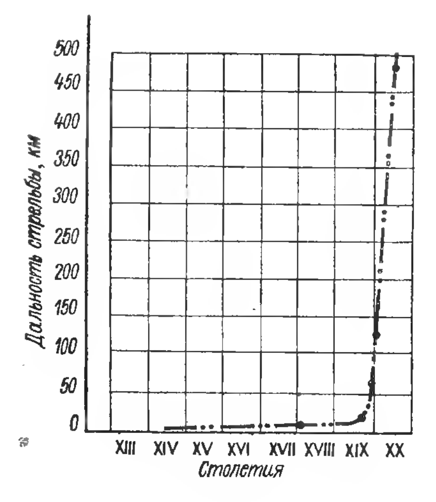


Рис. 129. Диаграмма роста дальности стрельбы.

редине XVIII в. она достигает двух, а к концу столетия 2,5 *км*.

В середине XVIII столетия появляются и первые нарезные орудия, резко повысившие точность ведения огня и увеличившие его дальность до 3,5 *км*. Не прошло и половины столетия, как дальность артиллерийского огня стала измеряться семью, а к концу XIX в., когда начали появляться стальные орудия, даже и десятью километрами.

В начале XX столетия нашим соотечественником Н. А. Забудским была создана опытная дальнобойная пушка, стрелявшая на дистанцию до 60 *км*. Несколько позже, в первую мировую войну, появляется немецкая пушка «большая Берта», дальность огня которой достигала 120 *км*. В двадцатых годах текущего столетия было создано советское дальнобойное орудие, обеспечившее стрельбу на дистанцию до 160 *км* и, наконец, в период второй мировой войны появилось ракетное оружие, позволившее стрелять по противнику на расстоянии до 480 *км*.

Непрерывное совершенствование нового оружия обеспечило достижение такой дальности боевого огня, когда любая точка на земной поверхности может быть поражена ракетным снарядом. Одним из основных факторов, оказавших влияние на увеличение дальности стрельбы (рис. 129), явилось использование в военном деле гироскопических свойств быстро вращающихся тел.

43

Артиллерийский снаряд-волчок

В те времена, когда для артиллерийской стрельбы использовались еще гладкоствольные пушки, снаряд покидал орудие, имея только поступательную скорость v_0 (рис. 130, *а*). Его продольная ось не стабилизировалась, и снаряд, встречая сопротивление воздуха, принимал самые произвольные положения, как бы кувыркаясь в полете. Часто при этом снаряд ударялся о цель боковой поверхностью или донной частью и не разрывался. Указанное обстоятельство снижало результаты стрельбы, или, как говорят, действительность артиллерийского огня, уменьшая его точность и дальность.

Описанные недостатки удалось устранить только с появлением нарезной артиллерии. Благодаря винтовым нарезам в канале ствола снаряду при вылете из орудия сообщалась не только поступательная скорость v_0, но и вращение вокруг своей продольной оси *AA* (рис. 130, *б*) с угловой скоростью Ω. В результате снаряд, обладающий

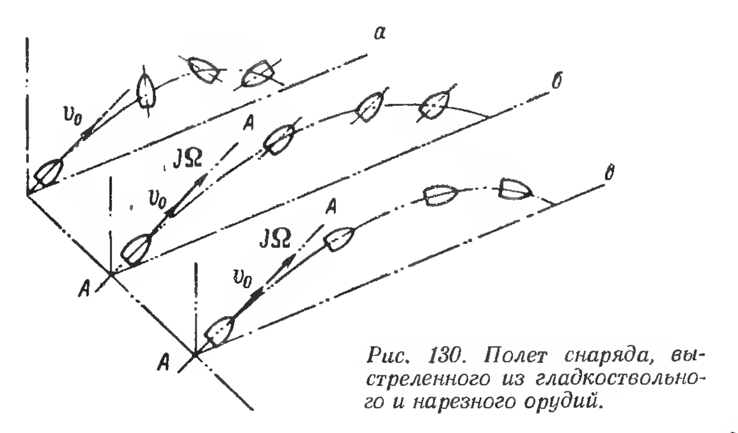


Рис. 130. Полет снаряда, выстреленного из гладкоствольного и нарезного орудий.

осевым моментом инерции J, развивал относительно оси AA кинетический момент $J\Omega$, превращаясь в своеобразный быстро вращающийся волчок, аналогичный изображенному на рис. 6.

Такой снаряд-волчок, согласно изложенному в § 11, стремится сохранить направление своей главной оси AA неизменным в пространстве. И если бы стрельба вращающимся снарядом производилась в безвоздушном пространстве, его ось AA перемещалась бы параллельно самой себе. В действительности снаряд движется в воздухе, испытывая его сопротивление. Опыт показывает, что равнодействующая R сил сопротивления воздушной среды приложена к снаряду в точке d (рис. 131), расположенной между его носовой частью и центром тяжести o. Поэтому при отклонении продольной оси ox снаряда от касательной NL к траектории движения его центра тяжести o сила R будет создавать относительно последнего момент.

Предположим, что ось ox снаряда отклонилась в плоскости стрельбы XOZ от направления движения NL на некоторый угол $-\beta$ (рис. 131, *а*). Сила R в этом случае создаст момент M_1, стремящийся повернуть снаряд вокруг его оси oy против часовой стрелки и тем самым увеличить угол $-\beta$. Но снаряд-волчок, подчиняясь закону прецессии, начнет поворачиваться вокруг оси oz, стремясь совместить вектор кинетического момента $J\Omega$ с вектором внешнего момента M_1. Его головная часть начнет отклоняться от плоскости стрельбы в направлении отрицательных значений угла α.

Как только ось ox снаряда составит с плоскостью стрельбы XOZ некоторый угол $-\alpha$ (рис. 131, *б*), сила R сразу же создаст момент M_2, стремящийся повернуть снаряд вокруг оси oz по часовой стрелке. В результате возникнет прецессионное движение снаряда вокруг оси oy и его ось ox начнет уходить под плоскость Loy, образуя с ней теперь уже положительный угол $+\beta$. При этом сила R создаст момент M_3, стремящийся повернуть снаряд опять

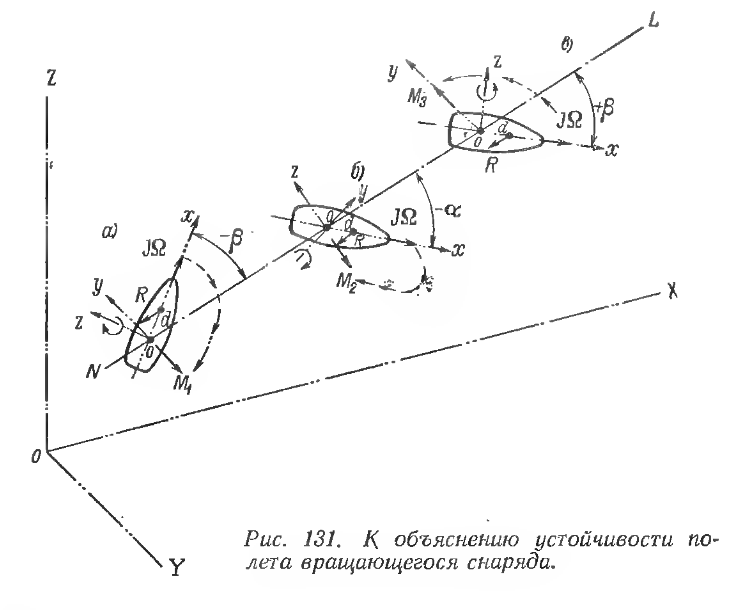


Рис. 131. К объяснению устойчивости полета вращающегося снаряда.

вокруг оси oy, но теперь уже против часовой стрелки (рис. 131, *в*). Под влиянием момента M_3 вращающийся снаряд начнет прецессировать вокруг оси oz в направлении против часовой стрелки, благодаря чему его ось ox будет отклоняться от плоскости стрельбы XOZ, удаляясь головной частью снаряда от читателя.

Описанное перемещение снаряда относительно плоскости стрельбы создаст условия, при которых сила R вновь породит момент, стремящийся повернуть снаряд вокруг оси oz против часовой стрелки. В результате возникнет прецессия снаряда вокруг оси oy и его продольная ось ox снова начнет подыматься над плоскостью Loy, повторяя тем самым рассмотренный цикл конусообразных колебаний снаряда. Последние будут происходить вокруг касательной NL с весьма малым углом при вершине конуса. Указанное

обстоятельство обеспечит устойчивое положение оси вращающегося снаряда в полете (рис. 130, *в*) и его движение головной частью вперед на протяжении всей траектории. Как видим, превращение снаряда во вращающийся волчок позволило артиллеристам надежно стабилизировать его положение относительно траектории полета и тем самым резко повысить точность стрельбы и ее дальность.

44

Гироскопические стабилизаторы артиллерийских орудий

Решая проблему повышения дальности стрельбы, военные специалисты уже многие десятки лет тому назад начали устанавливать артиллерийские орудия на корабли, бронепоезда, самолеты, танки и бронеавтомобили. Пользуясь подвижными средствами, каждая воюющая сторона стремилась продвинуть орудие как можно ближе к расположению противника, а в некоторых случаях и в глубину его тыловых коммуникаций, увеличивая тем самым общую дальность боевого огня орудий.

Во время боя перечисленные подвижные платформы обеих воюющих сторон вынуждены были открывать огонь из орудий, находясь в движении. В этих условиях из-за непрерывных колебаний движущихся платформ значительно усложнялась наводка орудия на выбранную цель и резко снижалась точность артиллерийской стрельбы.

Дело в том, что для поражения снарядом выбранной цели A (рис. 132, *а*), отстоящей от орудия на дистанции D, ему должен быть придан вполне определенный угол возвышения $\gamma_з$ над плоскостью горизонта. Это условие нетрудно выполнить при неподвижной платформе, например, при нахождении корабля в море в штилевую погоду. Заданный

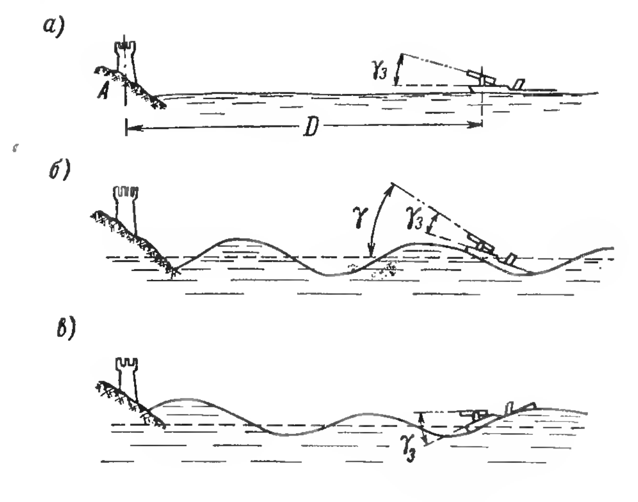


Рис. 132. Ошибки наведения орудия, порождаемые качкой подвижной платформы.

угол $\gamma_з$ может быть в этих условиях придан орудию непосредственно по отношению к неподвижной палубе корабля. Но при волнении на море, когда корабль, а вместе с ним и орудие изменяют свои положения относительно горизонта, произвести выстрел с требуемым углом возвышения трудно.

Как показано на схеме, в каждое новое мгновение ось канала ствола орудия занимает относительно горизонта все новые и новые положения. Угол возвышения γ принимает при этом то бóльшие (рис. 132, *б*), то меньшие (рис. 132, *в*) значения по сравнению с заданной величиной $\gamma_з$. Чтобы в какой-то мере парализовать вредные влияния качки на точность стрельбы из движущегося орудия, наводчику приходится, непрерывно работая механизмами наведения, все время поворачивать орудие относительно палубы корабля в направлении, противоположном ее наклону. Однако такой метод наведения подвижного орудия

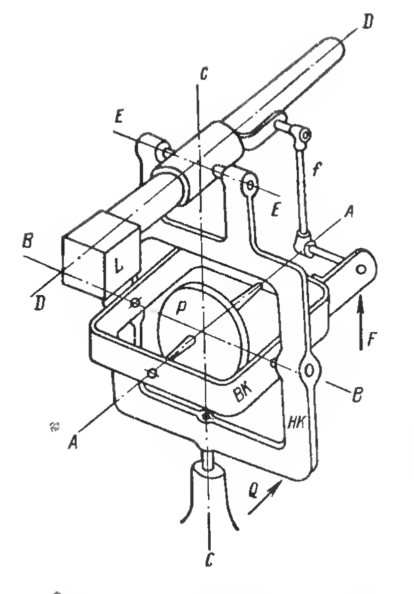


Рис. 133. Гироскопический стабилизатор артиллерийского орудия.

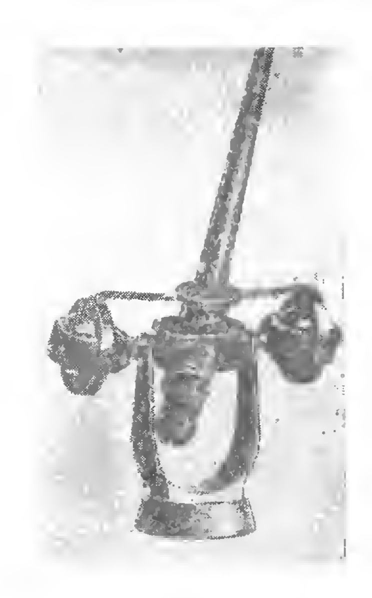


Рис. 134. Модель гироскопического стабилизатора орудия.

на цель, требующий от наводчика большой затраты энергии, далеко не разрешает возникших затруднений, так как процент попадания снарядов в выбранную цель остается при этом сравнительно низким.

В XIX в. делаются первые попытки использования гироскопа для удержания артиллерийского орудия в заданном направлении вне зависимости от колебаний платформы, на которой оно установлено. Одним из вариантов гироскопического стабилизатора артиллерийского орудия является предложенная П. П. Шиловским [40] конструкция, связывающая между собой гироскоп с тремя степенями свободы и легкую пушку (рис. 133). Орудие L связано в этой конструкции с помощью опор с наружным кардановым кольцом

НК и тягой *f* с внутренним кольцом *ВК* гироскопа. Поэтому при сообщении ротору *Р* вращения вокруг оси *АА* последняя, а вместе с ней и параллельно расположенная ось *DD* канала ствола орудия остаются стабильными в пространстве и не участвуют в колебаниях платформы.

Для наведения орудия использовалось прецессионное движение гироскопа. Воздействуя усилием *F* на внутреннее кольцо *ВК*, создавали прецессию гироскопа и связанного с ним орудия вокруг оси *СС*. При воздействии усилием *Q* на наружное *НК* кольцо гироскоп, прецессируя вокруг оси *ВВ*, поворачивает орудие вокруг оси *ЕЕ* его цапф.

Несколько видоизмененная модель описанного гироскопического стабилизатора артиллерийского орудия показана на рис. 134. Для непосредственной стабилизации даже легких орудий нужны мощные гироскопические устройства, габариты которых в некоторых случаях превосходят размеры самого орудия. С целью уменьшения габаритов гироскопического устройства в системах стабилизации артиллерийских орудий стали применять специальные двигатели. Гироскоп в этом случае используется только для управления серводвигателями аналогично управлению рулевыми машинками в автопилоте (см. § 32). Примером такого метода стабилизации артиллерийских орудий является стабилизатор танковой пушки, устанавливаемый в годы второй мировой войны на американских танках [146].

45

Гироскопический стабилизатор танковой пушки

В отличие от рассмотренной выше схемы гироскопического стабилизатора в настоящей системе гироскоп не связан непосредственно с орудием. Собранное в специальной коробке *ГК* гироскопическое устройство монтируется на кронштейне маски

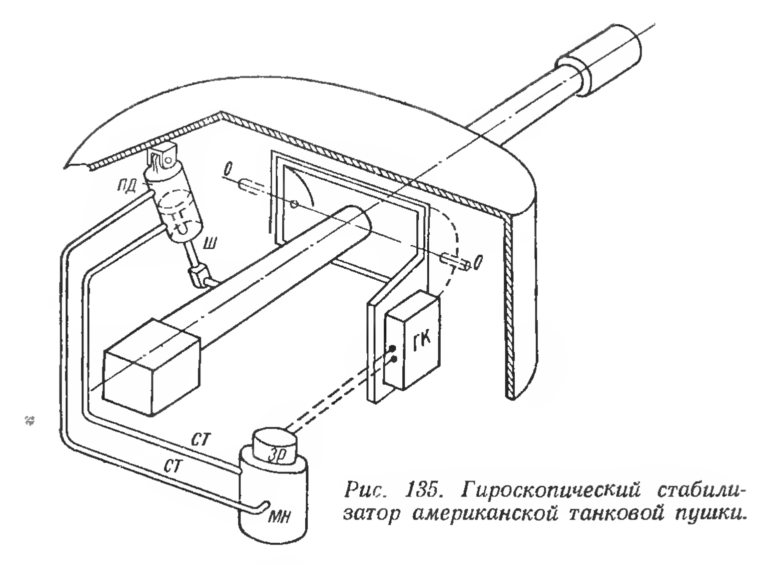


Рис. 135. Гироскопический стабилизатор американской танковой пушки.

орудия (рис. 135) и служит лишь для измерения его отклонений от заданного направления [103].

При колебаниях танка, происходящих во время его движения по местности, гироскоп, сохраняя стабильным свое положение в пространстве, включает при каждом наклоне башни танка относительно горизонта электрические контакты, установленные внутри коробки *ГК*. Тем самым подается электрический ток в золотниковый распределитель *ЗР* масляного насоса *МН*. В результате открывается доступ масла по одной из соединяющих трубок *СТ* в поршневой стабилизирующий двигатель *ПД*, шток *Ш* которого соединен с телом орудия.

Поступающее в двигатель *ПД* из насоса *МН* масло заставит поршень двигателя переместиться в его корпусе и повернуть орудие вокруг оси *ОО* его цапф. Включая распределитель *ЗР* таким образом, чтобы указанный поворот орудия происходил в направлении, обратном наклону

танка, и обеспечивают требуемую стабилизацию орудия под заданным углом к плоскости горизонта.

Чтобы повысить точность стабилизации, гироскопическое устройство выполняют состоящим из двух гироскопов: $Г_1$ и $Г_2$ (рис. 136). Первый гироскоп $Г_1$ имеет три степени свободы и несет на своем наружном кольце *НК*, выполненном в виде крестовины, управляющие контакты *ЭК*. При отклонении орудия от заданного направления гироскоп $Г_1$, сохраняющий свое положение стабильным в пространстве, повернется относительно основания *ГК* и переместит электрические пластинчатые контакты *ЭК* по отношению к рычагу *Р*.

С ростом угла отклонения орудия от заданного направления угол поворота гироскопа $Г_1$ в коробке *ГК* увеличивается и количество контактных пластин *ЭК*, включаемых в электрическую цепь рычагом *Р*, возрастает, увеличивая тем самым величину тока, подаваемого в золотниковый распределитель *ЗР* масляного насоса (рис. 135). Благодаря этому масло из насоса будет подаваться в стабилизирующий двигатель *ПД* в большем количестве, что и обеспечит поворот орудия вокруг оси *ОО* его цапф с более высокой скоростью.

Как видно из схемы (рис. 136), рычаг *Р* укреплен на гирокамере второго гироскопа $Г_2$, обладающего двумя степенями свободы и удерживаемого в нулевом положении относительно основания *ГК* спиральной пружиной *П*, ана-

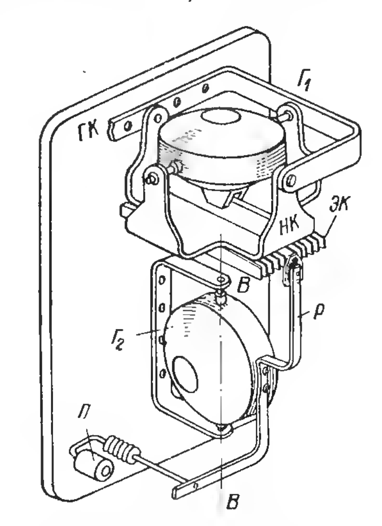


Рис. 136. Гироскопический узел стабилизатора американской танковой пушки.

логично тому, как это было выполнено в гироскопическом тахометре (см. рис. 88). Поэтому, как только возникнет скорость поворота орудия относительно плоскости горизонта, гиротахометр $Г_2$ повернется вокруг своей оси подвеса *ВВ* и сместит рычаг *Р* с его нулевого положения. Управляющие контакты *ЭК* подадут при этом ток в золотниковый распределитель *ЗР* (рис. 135), что и обеспечит воздействие стабилизирующего двигателя *ПД* на орудие в самом начале возникшего отклонения. Гироскоп $Г_2$ как бы упреждает появление отклонения орудия от заданного направления, повышая тем самым точность стабилизации.

Сравнивая схемы описанного гироскопического стабилизатора с серводвигателем и гироскопического стабилизатора непосредственного действия (рис. 133), нетрудно заметить, что первая из них позволяет выполнить гироскопическое устройство в значительно меньших габаритах. Последнее обстоятельство имеет весьма важное значение при практическом использовании гироскопических устройств на военных объектах.

46

Гироскопический стабилизатор линии прицеливания

Для повышения действительности артиллерийского огня при стрельбе с качающейся платформы не всегда необходимо стабилизировать само тело орудия. В некоторых случаях оказывается достаточным осуществить стабилизацию только прицельного устройства, которым оборудовано каждое орудие. Такой гиростабилизатор прицела состоит из гироскопа с тремя степенями свободы (рис. 137), главная ось *АА* которого расположена либо параллельно оптической оси прицела, либо перпендикулярно к ней [65].

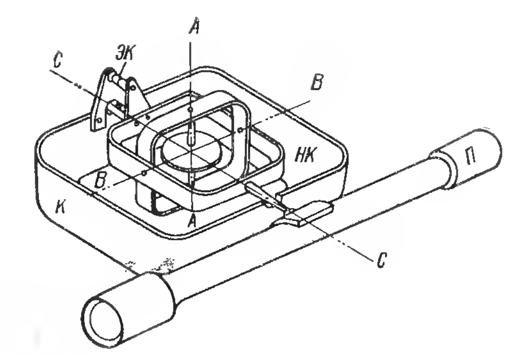


Рис. 137. Немецкий гироскопический стабилизатор линии прицеливания.

В обоих указанных вариантах на наружном кольце *НК*, жестко соединенном с оптическим прицелом *П*, устанавливается один, а на корпусе *К*, закрепленном на теле орудия,— второй контакт *ЭК* электрического управления выстрелом. Сообщая ротору описываемого прибора вращение вокруг оси *АА* с достаточно большой угловой скоростью, обеспечивают стабилизацию гироскопа и соединенного с ним прицела *П* относительно оси *СС*. В этом случае при колебаниях подвижной платформы около оси *СС* ствол установленного на ней орудия непрерывно изменяет свое положение относительно стабилизированного прицела (рис. 138, *а*).

Выстрел в такой системе стабилизации происходит автоматически в тот момент, когда управляющие контакты *ЭК* замыкаются (рис. 138, *б*) и подают электрический ток на запальное устройство, воспламеняющее пороховой заряд орудия.

Для наведения прицела на выбранную цель воздействуют на гироскоп внешним усилием, создающим моменты соответствующего направления относительно оси *ВВ* (рис. 137). Под влиянием этих моментов гироскоп, прецессируя вокруг наружной оси подвеса *СС*, поворачивает вместе с собой прицел аналогично тому, как это осуществля-

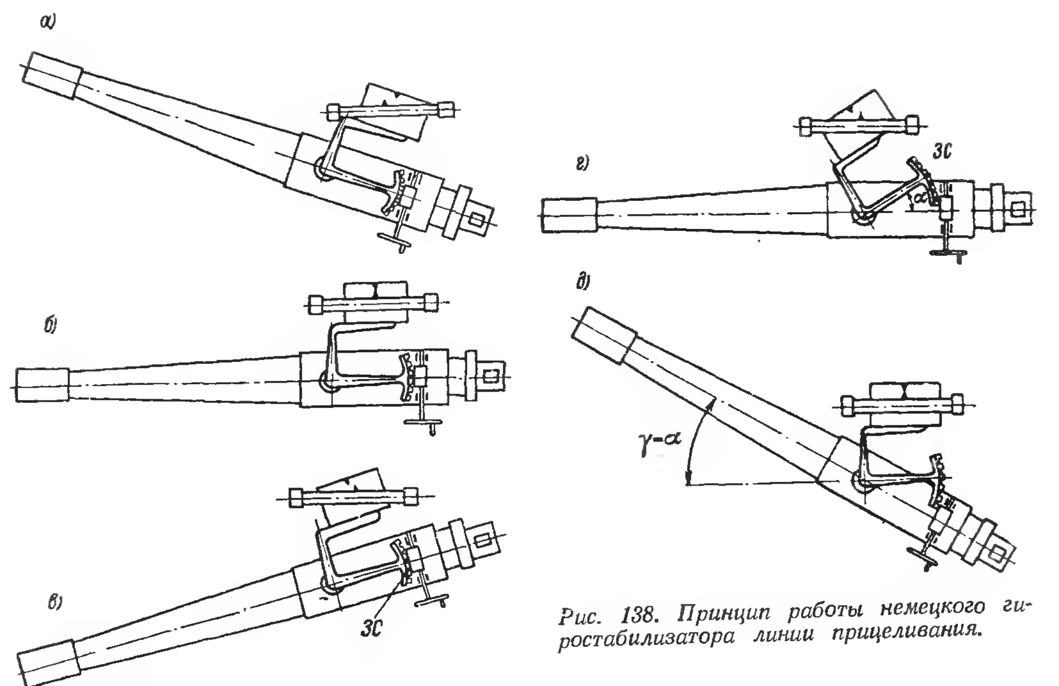


Рис. 138. Принцип работы немецкого гиростабилизатора линии прицеливания.

лось в гироскопическом стабилизаторе орудия (см. рис. 133).

Если в процессе ведения огня необходимо изменить угол возвышения орудия (рис. 138, *в*), наводчик, вращая рукоятку червячной передачи, поворачивает зубчатый сектор *ЗС*, изменяя тем самым положение корпуса гироскопического стабилизатора относительно орудия. Если зубчатый сектор *ЗС* будет повернут относительно орудия на некоторый угол α (рис. 138, *г*), то и выстрел из орудия будет происходить при угле возвышения $\gamma=\alpha$ (рис. 138, *д*). Таков принцип работы гироскопического стабилизатора линии прицеливания.

47

Танковый гирокомпас

Для производства правильного выстрела по выбранной цели орудию кроме заданного угла возвышения должно быть сообщено и правильное направление относительно плоскости меридиана, или, как говорят, в азимуте. Если цель видна наводчику, то это требование выполняется непосредственным наведением на нее орудия. В тех же случаях, когда цель не просматривается, для ориентирования орудия по азимуту приходится пользоваться приборами.

Морские артиллеристы для решения указанной задачи давно начали использовать гироскопический компас. Сложнее дело обстояло у танкистов, которые из-за малого объема боевого помещения танка не могли воспользоваться для этой цели морским гирокомпасом, обладающим большими габаритами (см. рис. 71). Поэтому вначале для азимутального ориентирования танков пытались использовать магнитный компас, но по тем же причинам, которые были указаны в § 16, от этой идеи пришлось отказаться

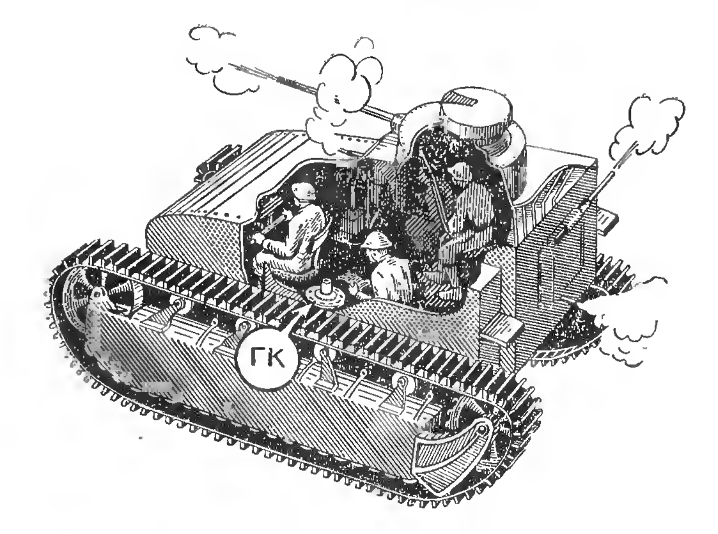


Рис. 139. Установка гирокомпаса на американском танке Т-2.

[92]. Последнее обстоятельство заставило все армии мира начать усиленные поиски возможностей создания малогабаритного гироскопического компаса для танков и бронеавтомобилей [104, 120].

И, наконец, требуемый гироскопический прибор был создан. Его малые габариты позволили удобно разместить гирокомпас внутри боевого помещения танка, как это и показано на примере установки гирокомпаса *ГК* на американском танке Т-2 (рис. 139). В современных условиях гирокомпас используется не только для вождения танков, но и для стабилизации их орудий в азимуте [112].

48

Гироскопический стабилизатор морской торпеды

Для поражения кораблей противника на больших расстояниях уже в начале XIX в. стали применять подводные самодвижущиеся снаряды, получившие название торпед. Такой снаряд выстреливается из торпедного аппарата в корабль противника (рис. 140). Пролетев на некотором расстоянии по воздуху, он погружается в воду. С этого момента движение торпеды обеспечивается установленным внутри ее корпуса пневматическим двигателем, вращающим гребные винты, расположенные в хвостовой части торпеды.

Чтобы погрузившаяся в воду торпеда двигалась в заданном направлении, ее снабжают четырьмя рулями управления. Два горизонтальных руля *РГ* служат для выдерживания движущейся торпеды на заданной глубине. Они управляются автоматом глубины, действие которого основано на законах гидростатики. Два других руля *РН*, расположенных вертикально, служат для выдерживания торпеды на заданном курсе. Перемещением этих двух рулей

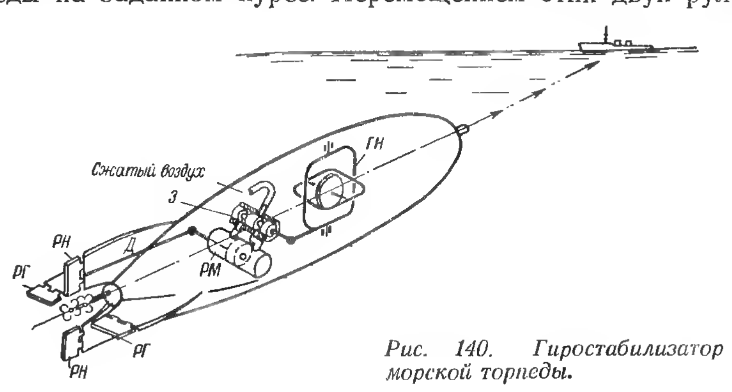


Рис. 140. Гиростабилизатор морской торпеды.

и управляет гироскоп направления *ГН*, который своим наружным кольцом подвеса связан со штоком золотника *З*. Поэтому при отклонении торпеды от заданного курса гироскоп *ГН*, сохраняя неизменным свое положение в пространстве, переместит шток золотника *З* и тем самым откроет доступ сжатого воздуха в цилиндр рулевой машинки *РМ* по одну сторону ее поршня.

Под воздействием сжатого воздуха поршень рулевой машинки *РМ* переместится внутри ее цилиндра и повернет на некоторый угол рычаг *Д* и связанные с ним рули направления *РН*. Поворот последних вызовет возвращение торпеды на заданный курс, причем, чем ближе подойдет она к выбранному в момент выстрела направлению, тем меньше будет угол поворота рулей. При совмещении продольной оси торпеды с заданным курсом рули направления займут исходное нейтральное положение и торпеда будет двигаться в требуемом направлении.

49

Гироскопические приборы, управляющие полетом самолета-снаряда

Дальнейшее увеличение дальности стрельбы было достигнуто в результате появления в конце второй мировой войны нового оружия — беспилотных автоматически управляемых самолетов-снарядов. Первые образцы нового оружия по своему виду, компоновке агрегатов и методам управления походили на обычные самолеты с автопилотом (см. рис. 105). Позже крыльям самолета-снаряда стали придавать стреловидную форму, значительно уменьшая их опорную площадь, а корпусу летательного аппарата — сигарообразную форму [83], благодаря чему современные реактивные самолеты-снаряды приобрели специфические контуры (рис. 141).



Рис. 141. Американский самолет-снаряд.

Самолеты-снаряды запускаются, как правило, с пусковой установки, которой придается наклон к горизонту (рис. 142). Полет снаряда осуществляется за счет энергии, развиваемой установленным на нем реактивным двигателем. Управление полетом с момента подъема снаряда в воздух до достижения им заданной цели осуществляется гироскопическим автопилотом. Рассмотрим принцип его работы на примере немецкого управляемого самолета-снаряда «Фау-I» (рис. 143).

Основным элементом рассматриваемого автопилота является гироскоп Γ_1 с тремя степенями свободы. Для того чтобы он мог реагировать на повороты снаряда вокруг осей $o_C y_C$ и $o_C z_C$, а также частично и вокруг оси $o_C x_C$, наружная ось CC подвеса гироскопа размещена параллельно оси $o_C y_C$ самолета-снаряда, а главная ось AA наклонена относительно плоскости $x_C o_C y_C$ летательного аппарата на угол ν, равный 12—15° [121].

При отклонении самолета-снаряда от плоскости горизонта в результате поворота вокруг оси $o_C y_C$ гироскоп Γ_1, сохраняя неизменным свое положение в пространстве, произведет поворот струйной трубки T_1 вокруг оси aa, парал-



Рис. 142. Старт американского самолета-снаряда.

лельной оси CC подвеса гироскопа. Трубка T_1, в которую под давлением нагнетается сжатый воздух, выйдет из нейтрального положения по отношению к приемнику $П_1$, жестко укрепленному на корпусе K гироскопа. Сжатый воздух начнет поступать только в один из двух заборных каналов приемника, создавая тем самым разность давлений в полостях пневматического реле $ПР_1$.

Под влиянием избыточного давления в одной из полостей пневмореле $ПР_1$ его мембрана прогнется и переместит золотник $З_1$ рулевой машинки $РМ_1$. Сжатый воздух, поступая теперь в рабочий цилиндр рулевой машинки, вызовет перемещение в нем поршня. Вследствие этого произойдет поворот руля высоты $РВ$ вокруг оси OO, чем и обеспечится возврат снаряда к горизонтальному положению.

Для большей точности стабилизации самолета-снаряда в горизонтальной плоскости в его автопилоте предусмотрен гироскопический тахометр $Г_2$, принцип действия которого был рассмотрен в § 26 (см. рис. 87). Реагируя на угловую скорость поворота снаряда вокруг оси $o_C y_C$, гироскоп $Г_2$ будет перемещать струйную трубку T_2 относительно приемника $П_2$, также связанного с пневмореле $ПР_1$. Так как гироскоп $Г_2$ быстрее реагирует на повороты летательного аппарата вокруг оси $o_C y_C$, чем гироскоп $Г_1$, то он будет оказывать влияние на перемещение руля высоты $РВ$

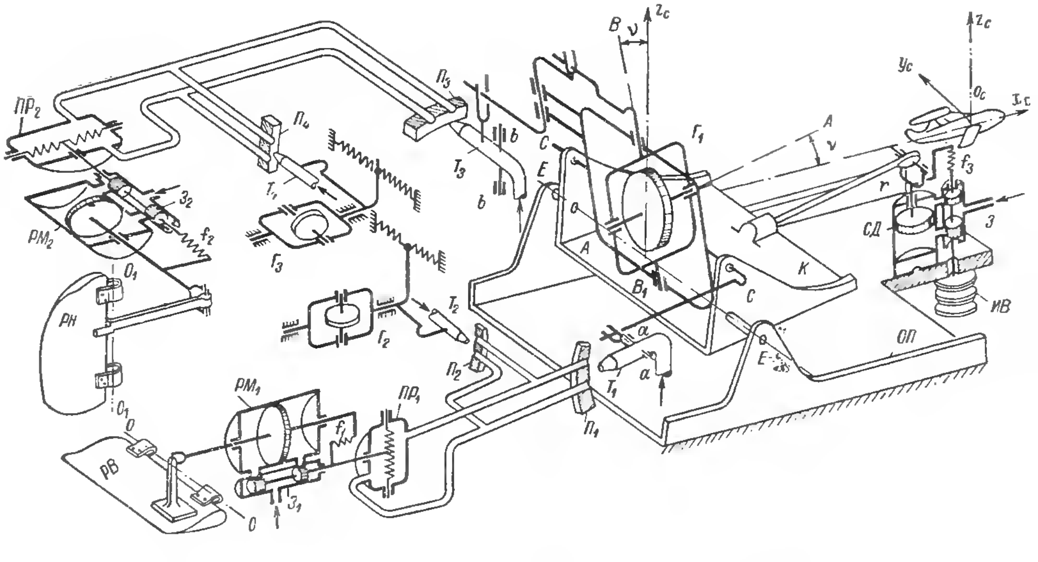


Рис. 143. Гироскопический автопилот немецкого самолета-снаряда «Фау-I»

как бы с некоторым упреждением по сравнению с влиянием на этот же процесс гироскопа Γ_1. В результате такого дополнительного воздействия гироскопа Γ_2 значительно уменьшатся отклонения снаряда от горизонтального положения.

Для стабилизации летательного аппарата на заданной высоте в автопилоте установлен измеритель высоты *ИВ*. Он представляет собой гофрированную мембранную коробку, из которой откачан воздух. Поэтому на разных высотах над уровнем моря в связи с изменением атмосферного давления мембранная коробка будет деформироваться на различную величину. Устанавливая нулевое положение золотника *З* в соответствии с величиной деформации мембранной коробки на выбранной высоте, получают возможность измерять отклонения снаряда от заданной высоты полета.

Мембранная коробка измерителя высоты *ИВ*, связанный с нею золотник *З* и пневматический серводвигатель *СД* укреплены на основании прибора *ОП*. Шток серводвигателя *СД* рычагом *r* связан с корпусом *К* гироскопа Γ_1. При отклонении снаряда от заданной высоты полета вследствие изменения атмосферного давления произойдет изменение величины деформации мембранной коробки, а следовательно, и перемещение штока золотника *З*. В результате рабочий поршень переместится в цилиндре серводвигателя *СД* и при помощи рычага *r* повернет корпус *К* гироскопа Γ_1.

Вместе с корпусом *К* совершит поворот вокруг оси *ЕЕ* и жестко связанный с ним приемник $П_1$, в то время как гироскоп Γ_1 и струйная трубка T_1 сохраняют свое положение неизменным в пространстве. Сжатый воздух, подаваемый через трубку T_1, начнет поступать опять только в одно заборное отверстие и тем самым создаст разность давлений в полостях пневмореле $ПР_1$, что вызовет поворот руля высоты *РВ* вокруг оси *ОО*. При этом направление поворота руля высоты *РВ* будет обусловливать возвращение

снаряда к заданной высоте полета. При достижении последней измеритель *ИВ* приведет золотник *З*, а следовательно, и корпус *К* гироскопа $Г_1$ в нейтральное положение, обеспечивая продолжение полета на заданной высоте.

Для выдерживания полета по заданному курсу внутреннее кольцо гироскопа $Г_1$ с помощью системы рычагов связано со струйной трубкой $Т_3$. Поэтому при отклонении летательного аппарата от заданного курса гироскоп $Г_1$, сохраняя свое положение неизменным в пространстве, вызовет поворот трубки $Т_3$ вокруг оси *bb*, смещая ее с нейтрали по отношению к приемнику $П_3$. Благодаря этому в полостях пневмореле $ПР_2$ возникнет разность давлений, что вызовет перемещение поршня рулевой машинки $РМ_2$ и необходимый поворот вокруг оси O_1O_1 связанного с ним руля направления *РН*.

С целью повышения точности стабилизации снаряда на курсе в системе автопилота применен второй гиротахометр $Г_3$, измеряющий угловую скорость поворота летательного аппарата вокруг оси o_Cz_C, а главная ось гироскопа $Г_1$ корректируется по магнитному компасу (см. § 29). Благодаря размещению внутренней оси *ВВ* подвеса гироскопа $Г_1$ под углом ν к оси o_Cz_C самолета-снаряда гироскоп $Г_1$ будет регистрировать и крен летательного аппарата при его повороте вокруг оси o_Cx_C. При этом струйная трубка $Т_3$ будет поворачиваться вокруг оси *bb*, отклоняясь от нейтрали приемника $П_3$ и вызывая тем самым поворот руля направления *РН* вокруг оси O_1O_1 на угол, необходимый для устранения возникшего крена.

С целью повышения точности стабилизации самолета-снаряда по курсу, высоте и крену и для устранения его излишних колебаний между штоками рулевых машинок и их золотниками установлены также цилиндрические пружины $f_1 - f_3$, обеспечивающие при перемещениях штоков рулевых машинок незначительные смещения штоков соответствующих золотников. Благодаря этому подача сжатого воздуха в полости рабочих цилиндров серводвигателей прекраща-

ется раньше, чем летательный аппарат возвратится к заданному направлению, что и обеспечивает более точное выдерживание выбранного режима полета самолета-снаряда.

50

Гироскопические приборы, управляющие полетом баллистической ракеты

По сравнению с самолетом-снарядом полет баллистической ракеты имеет некоторые отличия. Если двигатель первого работает на протяжении всего полета снаряда, то двигатель баллистической ракеты действует только в течение нескольких десятков секунд. Стартуя строго вертикально (рис. 144), баллистическая ракета на участке *Ca* (рис. 145) движется прямолинейно вверх в направлении *CZ*. Достигнув в точке *a* менее плотных слоев атмосферы, ракета начинает поворачиваться, принимая наклон к плоскости горизонта.

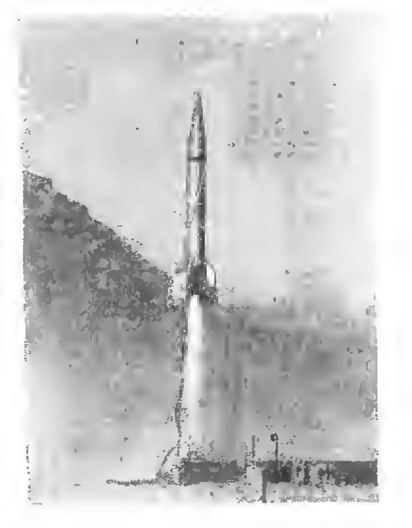


Рис. 144. Старт американской баллистической ракеты.

В точке *b* траектории, когда скорость ракеты достигает заданного максимального значения, угол наклона ее корпуса к горизонту становится равным около 45°. Именно в этот момент ракета входит в разреженные слои атмосферы, работа ее двигателя

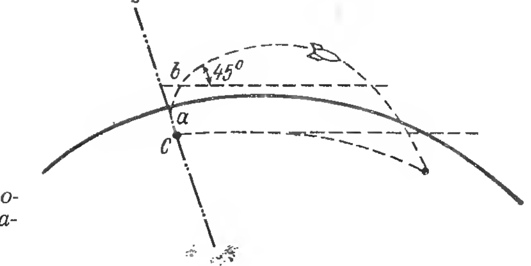


Рис. 145. Траектория полета баллистической ракеты.

прекращается и дальнейшее движение происходит по законам тела, брошенного под углом к горизонту [147].

Выполнение программы движения баллистической ракеты осуществляется с помощью трех гироскопов, каждый из которых обладает тремя степенями свободы. Первый из них $Г_1$ (рис. 146), называемый вертикантом, предназначен для определения углов отклонения ракеты по курсу и крену от заданного направления движения. Второй гироскоп $Г_2$, получивший название горизонта, служит для обеспечения программы поворота ракеты относительно плоскости горизонта. Третий гироскоп $Г_3$, называемый гироинтегратором, предназначен для выключения работы двигателя в момент достижения ракетой заданной максимальной скорости.

При отклонении ракеты от заданного направления курса, происходящем в результате ее поворота вокруг оси $o_c z_c$, гироскоп $Г_1$, сохраняя свое положение неизменным в пространстве, переместит движок потенциометра $П_1$. Снимаемый с него при этом электрический сигнал подается на рулевую машинку, которая, поворачивая необходимые рули управления, возвращает ракету на заданный курс.

Электрический сигнал, снимаемый с потенциометра $П_2$, пропорциональный углу крена летательного аппарата, поступая в автопилот, вызывает с помощью рулевой машинки такой поворот рулей управления, который устра-

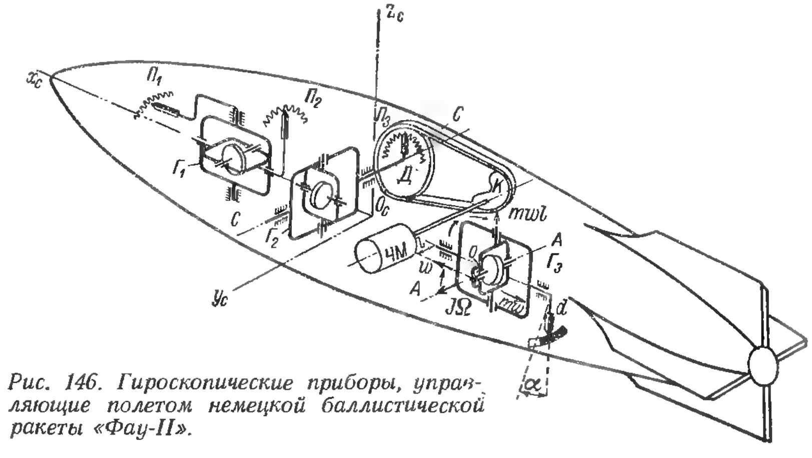


Рис. 146. Гироскопические приборы, управляющие полетом немецкой баллистической ракеты «Фау-II».

няет возникший крен. Отклонение ракеты от заданного положения относительно плоскости горизонта фиксируется гироскопом $Г_2$. Сигнал, снимаемый с его потенциометра $П_3$, пропорциональный углу поворота ракеты вокруг оси O_cy_c, подается на соответствующую рулевую машинку, которая, поворачивая рули управления, и обеспечивает устранение возникшего отклонения.

Для поворота ракеты относительно горизонтальной плоскости, который в соответствии с заданной программой движения должен быть осуществлен на участке траектории ab (рис. 145), потенциометр $П_3$ (рис. 146) смонтирован на диске *Д*. Последний с помощью ленточной передачи связан с профилированным кулачком *K*, приводимым часовым механизмом *ЧМ* во вращение вокруг оси, параллельной осям *CC* — подвеса гироскопа $Г_2$ и O_cy_c — ракеты.

Профиль кулачка *K* выполняется строго в соответствии с намеченной траекторией движения. Поэтому диск *Д*, а вместе с ним и обмотка потенциометра $П_3$, непрерывно вращаясь с переменной скоростью вокруг оси *CC*, поворачиваются с течением времени точно на такой угол, какой

должна занимать ракета относительно горизонта в данное мгновение. В результате описанного поворота потенциометра $П_3$ его нулевая точка смещается относительно движка, установленного на гироскопе $Г_2$. При этом условии с потенциометра $П_3$ будет сниматься сигнал, пропорциональный углу отклонения ракеты от требуемого положения по отношению к горизонту. Указанный сигнал, поступая на рулевую машинку, вызовет поворот рулей управления, что и приведет ракету к заданному по программе полета положению. Вот почему описанное устройство называют программным механизмом системы управления полетом баллистической ракеты.

Центр тяжести гироскопа $Г_3$ смещен на величину l вдоль оси AA относительно точки O его подвеса. Благодаря этому при ускоренном движении ракеты масса m гироскопа вследствие присущей ей инерции будет оказывать сопротивление силам, стремящимся сообщить ей ускорение w. Сила инерции, согласно формуле (1) равная произведению mw, будет создавать момент mwl, вектор которого совмещен с внутренней осью подвеса гироскопа $Г_3$.

Под влиянием момента mwl гироскоп начнет прецессировать вокруг своей наружной оси подвеса, увлекая за собой и движок d. Последний в процессе указанного поворота будет отклоняться от первоначального нулевого положения на все больший угол α. А так как движение ракеты с известным ускорением w позволяет определить ее скорость в любой момент времени, то можно заранее определить ту величину угла α, которая будет соответствовать максимальной скорости движения ракеты.

Как уже говорилось выше, при достижении ракетой максимальной скорости движения ее двигатель должен быть выключен. Чтобы эта операция происходила автоматически, движок d перемещается вначале по изолятору. И только после поворота на угол α он включит контакт, благодаря чему и сработает автомат выключения двигателя баллистической ракеты.

IX

ГИРОСКОП НА ПРОИЗВОДСТВЕ И В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ

51

Использование гироскопа в производственных процессах

С каждым годом гироскоп находит все большее применение в самых разнообразных производственных процессах. Уже с давних пор начали использовать гироскопический эффект при размоле пород различных минералов. Применяемые для этой цели мельничные бегуны (рис. 147) представляют собой два тяжелых цилиндрических катка, шарнирно связанных с главным валом *К* (рис. 148), ось *СС* которого расположена вертикально. Оба катка опираются на горизонтальную опорную плиту *N*.

Приводя вал *К* с помощью электрического двигателя *ЭД* во вращение вокруг оси *СС* с угловой скоростью ω, вызывают перекатывание катков по опорной плите, сообщая им тем самым вращение вокруг оси *АА* с угловой скоростью Ω. Если при этом насыпать на опорную плиту *N* породу какого-либо минерала, то катки накатываясь на отдельные куски породы, будут их растирать. Растирание будет происходить не только под действием силы веса *G* катков, но и за счет дополнительного давления, появляющегося с возникновением гироскопического момента.

При одновременном вращении каждого катка вокруг осей *АА* и *СС* с угловыми скоростями Ω и ω возникнет

Рис. 147. Мельничные бегуны.

Рис. 148. К объяснению действия гироскопического момента при работе мельничных бегунов.

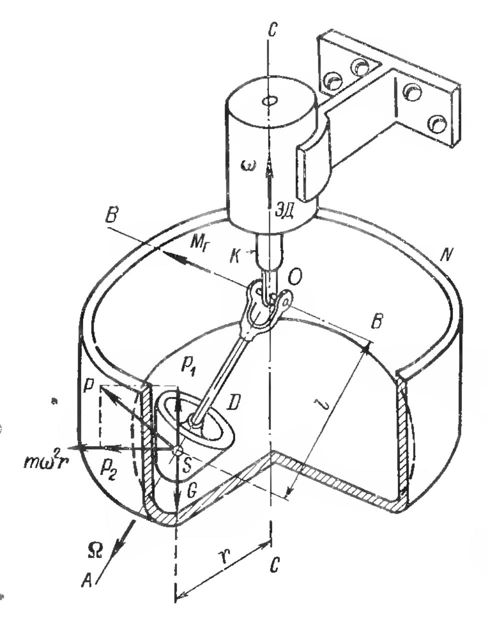


Рис. 149. К объяснению действия гироскопического момента при работе маятниковой мельницы.

гироскопический момент $M_г$. Он будет зависеть от момента инерции J катка относительно оси AA и угловых скоростей Ω и ω, а его величина согласно формуле (3) будет равна произведению $J\Omega\omega$. При удалении центра тяжести катка от оси вращения CC на величину l гироскопический момент $M_г$ будет оказывать на опорную плиту N дополнительное давление P, равное $J\Omega\omega/l$ согласно зависимости (4). Тем самым гироскопический момент будет способствовать более интенсивному дроблению породы [15, 49].

Аналогичная картина наблюдается и при работе маятниковой мельницы (рис. 149). В описываемой конструкции каток D подвешен как маятник в шарнире O вала K, благодаря чему он обладает свободой вращения вокруг оси BB. Приводя вал K с помощью электродвигателя $ЭД$ во враще-

ние вокруг оси CC, сообщают движение и катку D. При отвесном положении катка оси OA и CC несколько смещены относительно друг друга. Поэтому как только каток D будет приведен во вращение вокруг оси CC с угловой скоростью ω, он под влиянием центробежных сил инерции начнет отклоняться от этой оси к периферии, причем чем больше величина r отклонения от оси CC центра тяжести S катка D, обладающего весом G и соответственно массой $m=G/g$, тем больше будет величина центробежной силы $m\omega^2 r$. Последняя прижимает каток к вертикальной опорной стенке резервуара N, в то время как сила веса G катка ее ослабляет, стремясь возвратить каток к совмещению с вертикальной осью CC.

Однако действие катка D на опорную стенку резервуара N определяется не только указанными выше двумя силами $m\omega^2 r$ и G. Перекатываясь по внутренней вертикальной стенке резервуара, каток совершает вращение одновременно вокруг двух осей OA и CC соответственно с угловыми скоростями Ω и ω. Возникающий при этом гироскопический момент катка $M_г$ будет действовать относительно оси BB, создавая дополнительное давление P на опорную стенку резервуара. Направление действия давления P перпендикулярно к оси OA вращения катка, а его величина зависит от гироскопического момента $M_г$ и удаления l центра тяжести S катка D от оси BB. В рассматриваемом случае при моменте инерции катка относительно оси OA, равном J, усилие P определится формулой (4) и будет равно $J\Omega\omega/l$.

Раскладывая силу P на горизонтальную P_1 и вертикальную P_2 составляющие, заметим, что первая из них уменьшает вредное влияние силы G веса катка, а вторая увеличивает его полезное давление на опорную поверхность, определяемое центробежной силой $m\omega^2 r$. Таким образом, и в маятниковой мельнице гироскопический момент способствует более интенсивному дроблению породы, засыпаемой внутрь резервуара N.

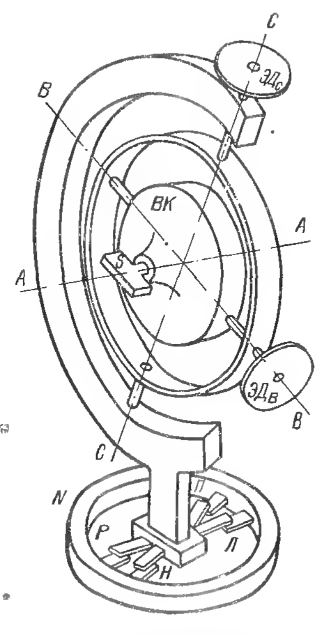


Рис. 150. Схема гироскопического приспособления для сварки мелких деталей.

Гироскоп применяется на производстве и как приспособление при сварочных работах. Оно представляет собой массивный ротор, вращающийся в гирокамере *ВК* (рис. 150), на крышках которой размещены приливы *S*, являющиеся площадками для закрепления мелких деталей, предназначенных для сварки. По осям *ВВ* и *СС* подвеса гироскопа установлены электрические двигатели $ЭД_В$ и $ЭД_С$, с помощью которых на него можно воздействовать внешними моментами различной величины и направления. Включение электродвигателей производится с помощью четырех реостатов, смонтированных в кожухе *N*. Каждая пара реостатов обеспечивает реверсирование и изменение величины моментов, развиваемых двигателями $ЭД_В$ и $ЭД_С$. Включением контактов *Р* или *Н* первой пары реостатов подают ток соответствующего направления в электродвигатель $ЭД_С$. Создаваемый им момент заставит гироскоп в соответствии с законом прецессии (см. § 11) поворачиваться вокруг оси *ВВ*, причем направление вращения будет зависеть от того, какой контакт (*Р* или *Н*) включен.

Включением контактов *П* или *Л* создается воздействие на гироскоп относительно оси *ВВ* момента двигателя $ЭД_В$, вызывающее прецессию вокруг оси *СС*. Ножное управление контактами *Р*, *Н*, *П* и *Л* обеспечивает перемещение площадки *S* в различных направлениях в пределах лю-

бого угла поворота. Благодаря такому приспособлению руки рабочего свободны от операций по перестановке свариваемых деталей (рис. 151), что значительно ускоряет процесс сварки, увеличивая производительность труда.

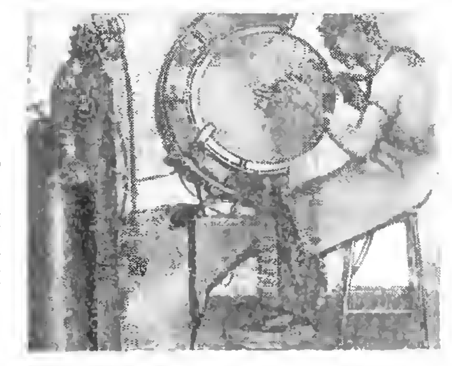


Рис. 151. Работа на гироскопическом приспособлении для сварки мелких деталей.

При осуществлении многих производственных процессов часто возникает необходимость непрерывно измерять весовой расход жидких материалов. Поскольку вес жидкости при изменении ее температуры не остается постоянным, то решение задачи связано с преодолением определенных трудностей. И только использование в этих целях гироскопического эффекта позволило наиболее полно удовлетворить требованиям, предъявляемым к приборам по мгновенному измерению потоков жидкости [96].

Сущность использования гироскопического эффекта в данном случае довольно проста. Расходуемая жидкость из резервуара P (рис. 152) поступает в Т-образный патрубок $П$, смонтированный в корпусе K прибора на опорах, снабженных специальными уплотнителями. На части патрубка $П$, находящейся внутри корпуса K, жестко крепятся шестерня $Ш$ и диск D. Приводя во вращение вал электрического двигателя $ЭД$, соединенного зубчатой передачей с патрубком $П$, сообщают последнему, а вместе с ним и диску D вращение вокруг продольной оси AA прибора с некоторой постоянной угловой скоростью ω. Таким образом, жидкость, протекающая внутри разветвленных концов патрубка $П$ со скоростью v, согласно изложенному

Рис. 152. Гироскопический измеритель массовых расходов жидкости.

в § 9, вынуждена двигаться с поворотным ускорением $w_п$ (рис. 153).

Из-за инертности массы m жидкости на концы Т-образного патрубка $П$ будут действовать силы инерции $mw_п$, которые и вызовут их деформацию. Величина последней Δ пропорциональна весовому расходу жидкости в любой момент времени. Действительно, масса m и скорость v протекающей по патрубку $П$ жидкости зависят от ее потребления. Поэтому силы инерции $2mv\omega$, а следовательно, и величина Δ порождаемых ими деформаций пропорциональны весовому расходу жидкости. Вот почему, измеряя с помощью индукционных датчиков L перемещения Δ концов T-образного патрубка $П$, узнают о массовом расходе жидкости в любой момент времени.

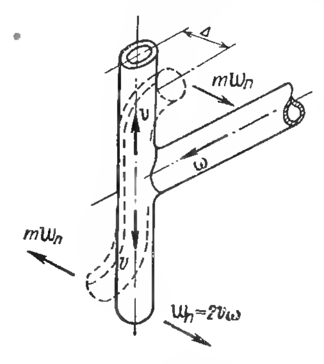


Рис. 153. Схема деформации патрубка гироскопического измерителя расходов жидкости.

Приведенными примерами не ограничиваются возможности применения гироскопического эффекта в производственных процессах. Известно, например, что его с успехом используют в некоторых разновидностях гидравлических насосов, при регулировке угловых скоростей вращения валов гидравлических турбин и электрических машин, для создания бесступенчатых редукторов, позволяющих манипулировать величиной угловой скорости того или иного агрегата и т. п.

52

Гироскопические приборы для изучения колебаний подвижных платформ

Движущиеся корабли, самолеты, дирижабли, ракеты, автомобили, как впрочем и все без исключения другие подвижные платформы, подвержены непрерывному воздействию внешних возмущений. Для корабля, плывущего по морю, причиной таких возмущений являются волны, для летящего самолета — порывы ветра, для автомобиля — неровности дороги и т. п. В результате воздействия указанных возмущений любая подвижная платформа начинает совершать колебания, размахи которых растут с увеличением возмущающих сил.

Колебания подвижных платформ усложняют управление их движением, увеличивают напряжения в элементах конструкции платформы, резко снижают скорость ее движения, приводят к более быстрому утомлению команды и т. п. Между тем определение амплитуды и периода колебаний той или иной платформы расчетным путем из-за большого количества факторов, на них влияющих, связано с громоздкой вычислительной работой и не всегда приводит к результатам, соответствующим действительным. Как правило, колебания подвижных платформ носят случайный

характер (см. рис. 83 и 118), что в еще большей мере усложняет расчетное определение их параметров. Вот почему колебания подвижных платформ предпочитают изучать экспериментально, непосредственно в процессе их движения в реальных условиях.

С этой целью в начале XX в. начали создавать гироскопические приборы, позволяющие записывать на ленте изменения во времени углов отклонения подвижной платформы от ее первоначально заданного положения. В этих приборах применяются гироскопы как с тремя, так и с двумя степенями свободы (рис. 154). В обоих случаях на кардановом кольце гироскопа устанавливается записывающее устройство, называемое обычно пером, которое и вычерчивает на движущейся ленте кривую изучаемых колебаний.

Установка записывающего пера на наружном кольце гироскопа с тремя степенями свободы (рис. 154, *а*) позволяет записывать углы отклонения платформы. Если же перо закрепить на кардановом кольце гироскопа с двумя степенями свободы, одна из которых ограничена пружинами (рис. 154, *б*), то на движущейся ленте прибора будут записываться изменения во времени угловых скоростей платформы.

Конструктивное выполнение первого варианта показано на рис. 155. Гироскоп *Г* с тремя степенями свободы, несущий на своем наружном кольце записывающее перо, остается стабильным в пространстве. Поэтому бумажная лента, помещенная в кассете *К*, жестко закрепленной в корпусе прибора, при колебаниях платформы, на которой установлен гироскопический самописец, совершает непрерывные перемещения относительно неподвижного пера. Именно эти перемещения и зафиксируются на ленте в виде кривой изменения во времени углов отклонения подвижной платформы от первоначально заданного ей положения.

Для изменения масштаба записи в приборе предусмотрен механизм *ПМ* перемены передаточного числа между

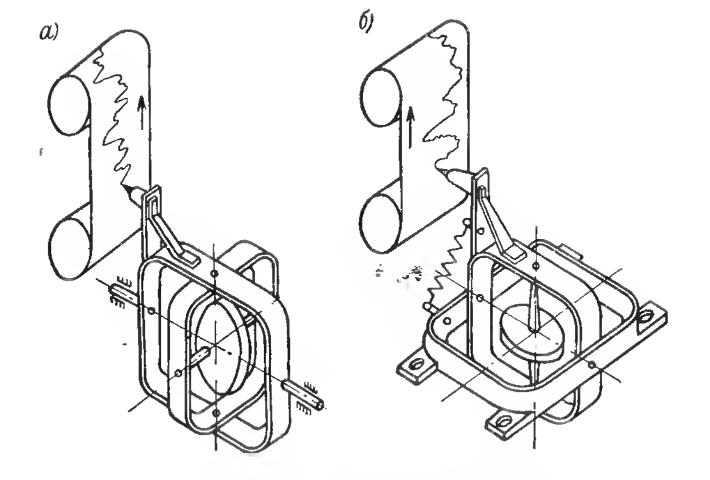


Рис. 154. Гироскопические самопишущие приборы.

валом мотор-генератора *МГ* и приводом ленты в кассете *К*. Генератор *МГ* вырабатывает одновременно переменный высокочастотный электрический ток для питания двигателя, приводящего во вращение ротор гироскопа *Г*.

Общий вид описанного гироскопического самопишущего прибора приведен на рис. 156. Он имеет незначительные габариты, удобен при переноске и прост в обращении. Записи, полученные с помощью гироскопических самопишущих приборов, позволяют подробно изучать влияние самых разнообразных факторов на динамику полета летательных аппаратов и на характер колебаний корабля на волнении. С помощью гироскопических самописцев изучаются качества рессорной подвески автомобиля или коляски мотоцикла. Они используются также при оценке работы различных стабилизирующих устройств и при проведении многих других аналогичных экспериментов.

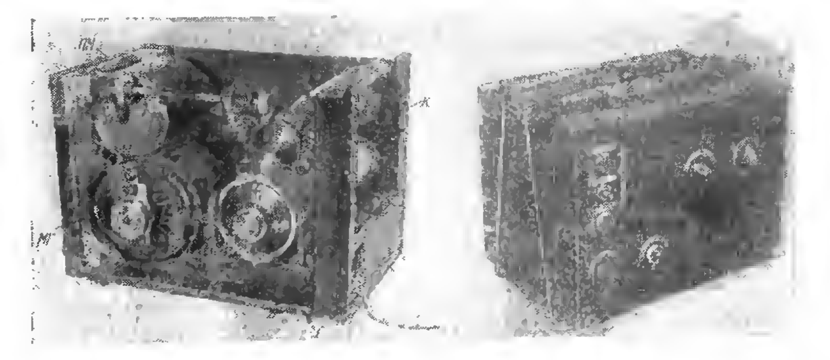


Рис. 155. Конструкция гироскопического самопишущего прибора.

Рис. 156. Общий вид гироскопического самопишущего прибора.

Так, например, размещая гироскопический самопишущий прибор в вагоне поезда или в кузове автомобиля, можно зарегистрировать действительные закругления участков пути как на железной дороге, так и на автостраде [53]. Устанавливая такой гироскопический прибор на автомобиле или тракторе, представляется возможным после объезда выбранного участка местности сразу же автоматически получить чертеж контура этого участка, уменьшенный в соответствующем масштабе. Описываемые гироскопические самописцы изготовляются в различных вариантах. С их помощью можно производить записи колебаний подвижных платформ как раздельно по одной какой-либо оси, так и одновременно по всем трем взаимно перпендикулярным осям.

В последнем случае самопишущий прибор обладает тремя гироскопами, аналогичными изображенным на рис. 154, оси подвеса которых расположены по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Вычерчиваемые ими на одной ленте кривые [32] позволяют составлять полное суждение об изменениях положения самолета в пространстве.

53

Гироскоп на строительстве

Рассмотренные выше гироскопические самопишущие приборы в последнее время нашли себе применение и в строительном деле. Они успешно используются для измерения параметров колебаний телевизионных и радиомачт, многоэтажных зданий, дымовых труб и многих других высотных сооружений [135]. Внедрение гироскопа в инженерно-строительную практику было обусловлено необходимостью периодического контроля колебаний высотных сооружений одновременно в нескольких точках. С этой целью в наиболее характерных пунктах сооружения, расположенных на различной высоте от его основания, устанавливаются гироскопические самопишущие приборы, аналогичные описанным выше (§ 52). Производя их одновременное включение, обеспечивают получение графиков колебаний исследуемого сооружения в различных заранее выбранных точках его конструкции, записанных синхронно во времени. Последующая обработка полученных таким способом графиков и позволяет составить полное суждение о характере колебаний сооружения.

Гироскопические самопишущие приборы могут быть использованы также для контроля углов скручивания отдельных конструктивных элементов сооружения в том или ином их поперечном сечении. Кроме того, они позволяют вести контроль на расстоянии за правильностью положения строительных блоков в момент постановки их на фундамент или сочленения с другими конструктивными элементами крупноблочных сооружений.

54

Гироскоп на службе у фотокорреспондентов, кинорепортеров и в автомобильной инспекции

Для наблюдения за далеко отстоящими предметами люди уже давно начали использовать такие оптические приборы, как, например, подзорные трубы, бинокли и т. п. Чем меньше размеры наблюдаемого предмета и чем на большее расстояние он удален от наблюдателя, тем бо́льшим увеличением должно обладать оптическое устройство. Между тем из-за дрожания рук, присущего в той или иной мере каждому человеку, которое обычно нами не замечается, многократное увеличение бинокля практически не может быть использовано.

Дело в том, что дрожание рук человека передается корпусу бинокля, отчего наблюдаемая в него картина смазывается тем интенсивнее, чем бо́льшим увеличением бинокль обладает. Устранить этот недостаток удалось только после того, как конструкторы обратились к помощи гироскопа.

На одной международной выставке [148] посетителям предлагали обычный шестикратный бинокль и просили прочитать текст плаката, помещенного в противоположном конце зала. После того как выяснялось, что сделать это не удается, наблюдателю предлагали бинокль с десятикратным увеличением. Однако новый бинокль приводил к еще худшим результатам: плакат просматривался в этом случае как в тумане. И только при пользовании биноклем, снабженным гироскопическим стабилизатором, текст плаката читался свободно.

Описываемый гиростабилизатор размещается в небольшом корпусе, жестко соединенном с биноклем (рис. 157), и приводится в действие от портативной акку-

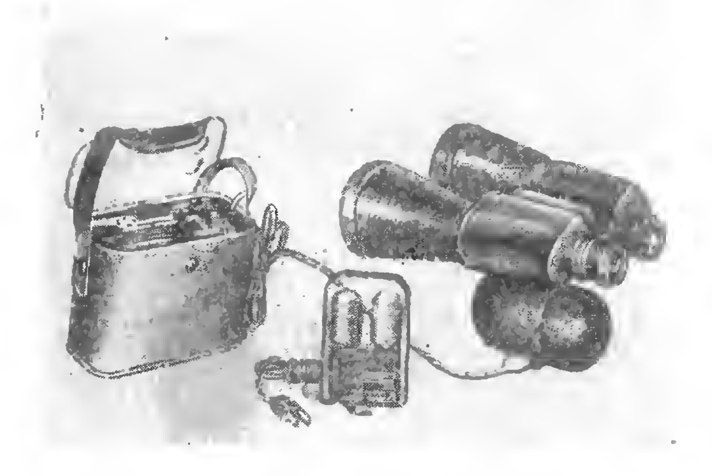


Рис. 157. Комплект бинокля с гиростабилизатором.

муляторной батареи, смонтированной в удобном футляре, который с помощью ремня надевается на плечо. В комплект прибора, кроме того, входит устройство для подзарядки аккумулятора, снабженное автоматом, отключающим при полной зарядке аккумулятора его питание, осуществляемое от обычной городской электрической сети.

Схема принципиального устройства стабилизатора приведена на рис. 158. Внутри корпуса K размещены два гироскопа, обладающие двумя степенями свободы относительно оптического прибора. Оси BB и B_1B_1 подвесов этих гироскопов отклонены от оси Oz прибора на 45° в разные стороны и составляют между собой прямой угол. Благодаря такому расположению каждый гироскоп оказывает противодействие возмущающим моментам, стремящимся повернуть оптический прибор вокруг осей Oy и Oz. При этом один из гироскопов реагирует на составляющие внешних возмущающих моментов, направленные в плоскости yOz

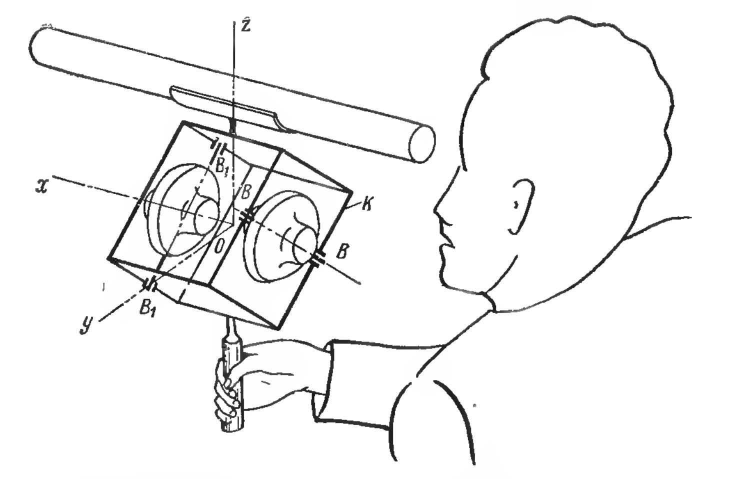


Рис. 158. Принципиальная схема гиростабилизатора оптических устройств.

перпендикулярно к его оси подвеса B_1B_1. В свою очередь второй гироскоп реагирует на составляющие внешних моментов, направленные в той же плоскости yOz, но перпендикулярно к оси BB подвеса второго гироскопа. При воздействии возмущающих моментов гироскопы стабилизатора, прецессируя вокруг своих осей подвеса, создают моменты гироскопических реакций, которые и уравновешивают внешние возмущения, аналогично тому, как это происходит в гироскопическом успокоителе качки автомобиля (см. рис. 116).

Рассматриваемый гироскопический стабилизатор, демпфируя колебания рук человека, резко улучшает качество наблюдения через оптические приборы многократного увеличения. Благодаря указанному преимуществу гироскопические стабилизаторы с успехом используются в фото- и киноаппаратуре (рис. 159), особенно при съемках, требующих применения длиннофокусных объективов.



Рис. 159. Гиростабилизатор киноаппарата.



Рис. 160. Гиростабилизатор бинокля автоинспектора.

В последние годы бинокли с гиростабилизаторами пришли на службу и в автомобильную инспекцию [78], призванную следить за безопасностью движения автомобильного транспорта. Часто инспекторам приходится записывать номер автомобиля нарушителя правил движения на большом расстоянии от него или во время быстрой езды, когда трудно разглядеть цифры номера. Снабжая бинокль многократного увеличения гироскопическим стабилизатором (рис. 160), изолируют оптический прибор от колебаний рук человека и корпуса догоняющего автомобиля, позволяя инспектору с помощью такого прибора даже в сложных условиях, ясно различать номера машин на большом удалении.

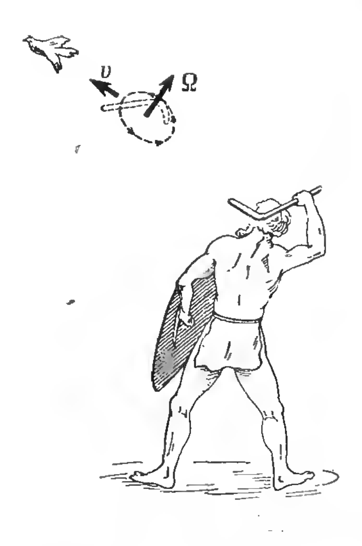
55

Использование гироскопического эффекта на охоте и в цирковых упражнениях

Люди уже в глубокой древности были знакомы с замечательными свойствами быстро вращающихся тел. Первобытный человек, использовавший метательные палицы при охоте на птиц и животных, обнаружил однажды, что закрученная при броске палка летит точнее и дальше, чем обычная. Постепенно совершенствуя такой метательный снаряд, племена, не знавшие в те времена лука и стрел, создали бумеранг, получивший широкое распространение у австралийцев, индейцев из Нью-Мексико, горных племен южной Индии и многих других народностей [70, 133].

Бумеранг представляет собой изогнутую под углом 100—120° деревянную пластину толщиной около 1 *см*, длина которой достигает полуметра (рис. 161). Такой метательный снаряд обладает удивительным свойством возвращаться после поражения летящей птицы к охотнику. Происходит это потому, что при метании бумерангу сообщают не только поступательную скорость v в плоскости, наклонной к горизонту, но и собственное вращение с угловой скоростью Ω вокруг оси, перпендикулярной к плоскости бумеранга. Таким образом, последний превращается в своеобразный волчок, сохраняющий ось своего вращения стабильной в пространстве в течение всего времени полета. Когда энергия, сообщенная при броске рассматриваемому снаряду, либо иссякает из-за сопротивления воздуха, либо затрачивается на поражение птицы, бумеранг, продолжая вращаться, начинает под действием силы тяжести падать вниз.

Однако это падение происходит не по вертикальной линии. Вследствие сопротивления воздуха вращающийся бумеранг, сохраняя положение оси своего вращения неизмен-



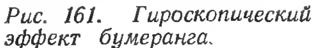


Рис. 161. Гироскопический эффект бумеранга.



Рис. 162. Бумеранги массового изготовления.

ным в пространстве, начинает скользить по воздуху, опускаясь вниз по наклонной к горизонту плоскости. Так как угол между плоскостями вращения снаряда и горизонта остается постоянным, бумеранг, не встретив на своем обратном пути какого-либо препятствия, возвращается, как правило, к охотнику.

В настоящее время бумеранг из орудия охоты превращается в спортивный снаряд и памятный сувенир для туристов, путешествующих по Австралии. Его изготовляют теперь в массовых количествах из пластмассы любых расцветок и с различным качеством отделки (рис. 162). Деревянный бумеранг остался пока еще только на северо-западе Австралии, в районах, наиболее удаленных от цивилизованных центров, где коренные жители страны

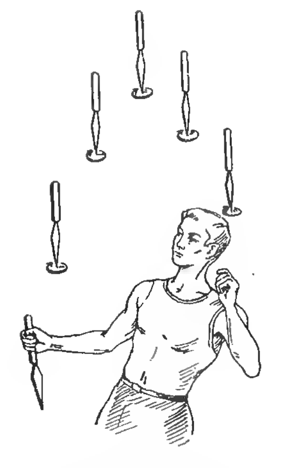


Рис. 163. Жонглирование быстро вращающимися ножами.

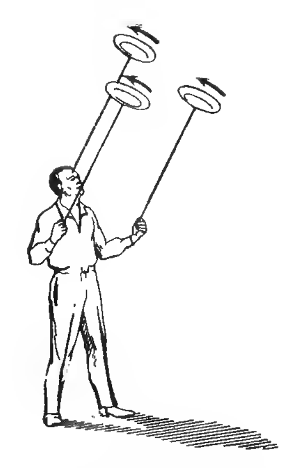


Рис. 164. Жонглирование быстро вращающимися тарелками.

используют его на охоте, при спортивных играх и во время исполнения племенных ритуалов.

Гироскопические свойства быстро вращающихся тел используются и в самом древнем виде искусства — цирковых упражнениях. Проследите внимательно за работой жонглеров и вы увидите, что они, бросая в воздух целый поток ножей (рис. 163), придают им вращение вокруг их продольных осей. Благодаря этому ножи приобретают свойство стабилизации оси своего вращения в пространстве, обеспечивая тем самым выполнение артистом эффектных упражнений.

Та же картина наблюдается при вращении на концах длинных стержней мячей или тарелок (рис. 164). Жонглер удерживает вращающийся мяч на кончике кинжала, заставляет его путешествовать на туго натянутой веревке или

лезвии ножа. Выполнение всех этих движений также основано на использовании гироскопического эффекта, который приобретается любым предметом, как только ему сообщается быстрое вращение.

56

Гироскоп в спорте

Гироскопические свойства быстро вращающихся тел с успехом используются и во время спортивных соревнований. Так, например, при таком спортивном состязании, как метание диска, которое еще в 708 году до нашей эры было включено в программу Олимпийских игр древней Греции [82], гироскопический эффект играет важную роль. В самом деле, во время полета диск, так же как и артиллерийский снаряд (см. § 43), испытывает сопротивление воздуха. При этом аэродинамические силы набегающего воздушного потока стремятся так развернуть диск, чтобы расположить плоскость его вращения перпендикулярно к потоку.

Для устранения указанного недостатка диску в момент выпускания его из рук сообщается не только поступательная скорость v (рис. 165), но и вращение вокруг оси симметрии AA. Угловая скорость Ω этого вращения составляет обычно 5—8 оборотов в секунду [136]. Превращаясь благодаря сообщенному вращению в гироскоп, диск оказывает достаточное сопротивление аэродинамическим силам. Ось его

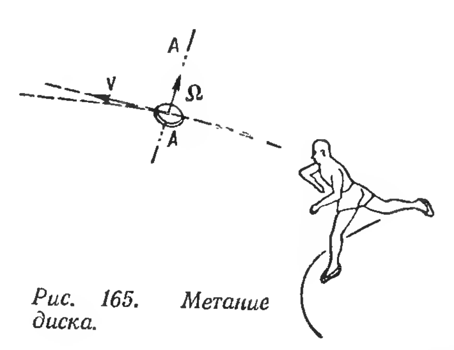


Рис. 165. Метание диска.

симметрии сохраняет в этих условиях свое направление неизменным в пространстве, обеспечивая тем самым наибольшую дальность полета диска.

Поворотное ускорение используется спортсменами и при метании молота. Придавая ему ускоренное вращение вокруг наклонной к плоскости горизонта оси AA (рис. 166), метатель стремится сообщить молоту как можно бо́льшую угловую скорость Ω. Поэтому в первый период подготовки к броску движение молота по окружности радиусом $R = Oa$ происходит со все увеличивающейся окружной скоростью v, равной, согласно изложенному в § 9 (см. рис. 19), произведению ΩR.

Чтобы к моменту броска еще больше увеличить скорость движения молота, метатель во втором, заключительном, этапе подготовки к броску делает два резких поворота вокруг вертикали OZ (рис. 166) со все увеличивающейся угловой скоростью ω. Тем самым создаются условия движения молота с поворотным ускорением, которое согласно изложенному в § 9 будет обусловливать появление силы инерции P, достигающей максимального значения в точке e траектории движения молота по окружности радиуса R. Равнодействующая двух сил — силы F, действующей на молот при его вращении вокруг оси AA, и силы инерции P — и обеспечивает сообщение молоту в момент броска максимальной начальной скорости v_0, а тем самым при всех прочих равных условиях и максимальной дальности его полета.

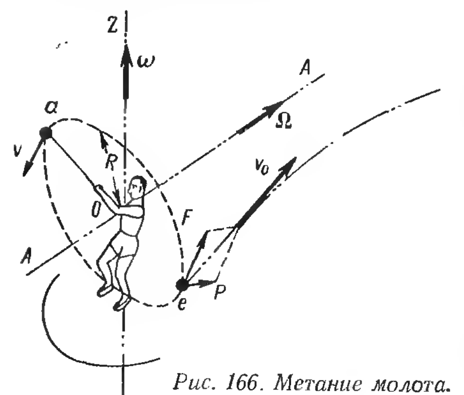


Рис. 166. Метание молота.

Законы движения гироскопа используются и при упражнениях на ренском колесе, входящих

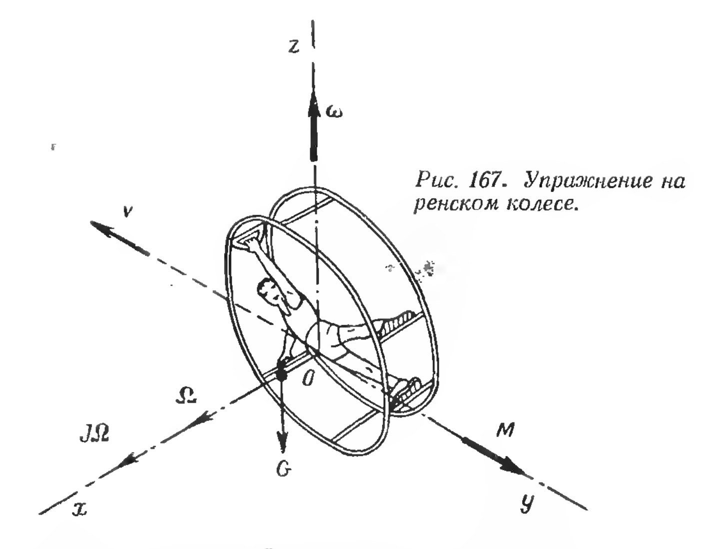


Рис. 167. Упражнение на ренском колесе.

в комплекс физической подготовки летчиков и космонавтов. Колесо состоит из двух легких металлических обручей, соединенных между собой несколькими перемычками (рис. 167). На двух из них расположены оборудованные крепежными ремнями площадки для ног спортсмена. Две другие являются рукоятками. Укрепляя ноги на площадках и держась руками за рукоятки, тренирующийся движением своего тела раскручивает колесо вокруг оси Ox, придавая ему некоторую угловую скорость Ω. Благодаря сообщенному таким образом вращению колесо движется со скоростью v вдоль оси Oy, заставляя человека принимать различные положения относительно плоскости горизонта.

При описанном вращении возникает кинетический момент $J\Omega$, тем больший, чем больше суммарный момент инерции J спортсмена и колеса относительно оси Ox. Поэтому для поворота колеса, например, вокруг оси Oz

спортсмену достаточно сместить центр своей тяжести относительно точки O колеса вдоль оси Ox в сторону желаемого поворота. Так, если центр тяжести человека будет смещен по оси Ox в положительном направлении, то сила G его тяжести создаст относительно оси Oy момент M. Последний, согласно изложенному в § 11, и вызовет прецессию колеса вокруг оси Oz с угловой скоростью ω, величина которой определится равенством (7). Изменяя величину и направление момента M силы тяжести G, спортсмен может совершать движение на ренском колесе по весьма эффектным сложным траекториям [95].

Описанными примерами не ограничивается использование гироскопического эффекта в спортивных играх и упражнениях. При фигурном катании на коньках, прыжках в воду, гимнастических упражнениях, в художественной гимнастике и во многих других видах спорта гироскопический эффект широко используется спортсменами при выполнении сложных фигур. Для того чтобы баскетбольный или волейбольный мяч двигался строго в желаемом направлении, ему сообщается быстрое вращение вокруг соответствующей оси. Законы движения гироскопа используются спортсменами также и с целью резкого изменения направления и скорости полета футбольного и теннисного мячей и во многих других спортивных играх.

57

Гироскопические игрушки

Движущийся и, в особенности, быстро вращающийся предмет всегда привлекает внимание ребенка. Первоначальное желание схватить этот предмет с течением времени переходит в стремление ребенка заставить его своими силами совершать враще-

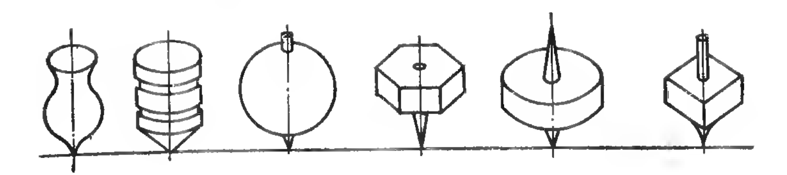


Рис. 168. Различные формы волчков.

ние. Вероятно такое естественное желание и явилось причиной повсеместного возникновения древнейшей народной игрушки — вращающегося волчка.

В России волчку, изготовляемому, как правило, из дерева, придавали самую разнообразную форму (рис. 168) и называли соответственно кубарем, точкой, вертушкой, дзыгой, юлой, кружилкой [123]. В Белоруссии встречались волчки, изготовленные из картофеля, репы и луковицы [128]. В Грузии волчок, называемый шуко, изготовляли не только из дерева, но и из орехов [131]. У юраков, живущих на севере Сибири по берегам нижнего течения реки Таза, существовали деревянные волчки, острая ножка которых постепенно переходила вверху в рюмочку с цилиндрическим отверстием на ее боковой поверхности. В рюмочку из чумового костра бросали уголек. При раскрученном волчке воздух поддувал в боковое отверстие рюмочки и находящийся в ней уголек ярко разгорался. Двигаясь вместе с волчком, светящийся уголек вычерчивал в полутемном чуме причудливые узоры, привлекая к себе внимание не только детей, но и взрослых. Такие наблюдения за движением волчка помогали людям крайнего Севера коротать длинные зимние вечера [116].

Распространение волчка не ограничивалось только европейскими странами. Как народная игрушка он был давно известен и в Америке, и в Японии. В Индонезии волчки мастерили из глины, перемешанной с волосом, в Австралии — из раковин улиток, на Филиппинских островах — из кокосовых орехов. И везде вращающийся

волчок вызывал живой интерес пытливых людей. Он и в наше время остается одной из любимейших игрушек детей [88].

Детские волчки выпускаются теперь промышленностью в больших количествах. Им придается красивая форма (рис. 169), корпус волчка снабжается музыкальным устройством и его наружная поверхность ярко раскрашивается. Если рукояткой *P* такого волчка, снабженной ходовым винтом, произвести несколько вертикальных возвратно-поступательных движений вдоль оси *AA*, то волчок, в теле которого неподвижно закреплена ходовая гайка, будет приведен во вращение вокруг этой оси.

Кроме волчка, можно встретить и более оригинальные гироскопические игрушки. Одна из них состоит из коромысла *N* (рис. 170), опирающегося заостренным концом соединенного с ним штифта *F* на подставку *K*. На более длинном конце коромысла *N* закреплена модель самолетика, а на коротком смонтирован ротор *P*, который с помощью бечевки может быть приведен во вращение вокруг продольной оси *AA* коромысла. Длинное плечо коромысла *N* весит больше короткого, вследствие чего его центр тяжести не совпадает с точкой *O* опоры коромысла на основании *K*. Вес *G* коромысла, совмещенный с его центром тяжести, удаленным от точки подвеса *O* на расстояние l, создает относительно последней момент Gl.

Если привести ротор *P* во вращение вокруг оси *AA* с угловой скоростью Ω и тем самым сообщить ему кинетический момент $J\Omega$, то под действием момента Gl волчок начнет сразу же прецессировать вокруг оси *CC*, стремясь совместить вектор кинетического момента $J\Omega$ с вектором внешнего момента Gl (см. § 11). Вместе с ротором *P* вокруг оси *CC* будет поворачиваться и коромысло *N*, а следовательно, и модель самолетика, создавая полное впечатление о его полете вокруг оси *CC*.

В таких гироскопических игрушках, как однорельсовый вагончик (рис. 171) или «танцор на канате» (рис. 172), основной частью является приводимый во вращение

Рис. 169. Игрушечный волчок.

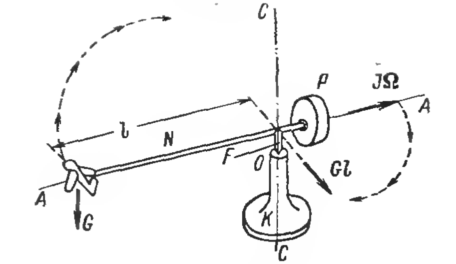


Рис. 170. Гироскопическая игрушка «летающий самолет».

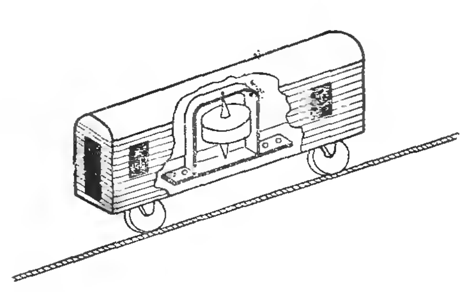


Рис. 171. Игрушечный однорельсовый гироскопический вагончик.



Рис. 172. Гироскопическая игрушка «танцор на канате».

вокруг своей продольной оси ротор, масса которого и стабилизирует эти игрушки на натянутой проволоке. И танцор, и вагончик, пока вращается ротор, перемещаются по проволоке вертикально, не падая вниз.

Проявление гироскопического эффекта используется в древнейшей грузинской игре «полисудри». Полисудри представляет собой деревянный диск (рис. 173, *а*), выполненный заодно с валом, на который наматывается шелковый шнурок длиной около 1,5 *м*. Держа свободный конец шнурка в руке, опускают полисудри вниз. При разматывании шнурка диск полисудри начинает вращаться вокруг своей оси с большой угловой скоростью (рис. 173, *б*). Именно поэтому к моменту, когда шнурок будет полностью раскручен и диск опустится до конца вниз (рис. 173, *в*), его вращение не прекратится. Стабилизируя ось своего вращения в пространстве, диск полисудри, так же как и обычный волчок, двигаясь по инерции, начнет наматывать шнурок на вал (рис. 173, *г*). Небольшое движение рукой помогает диску подыматься по шнурку вверх (рис. 173, *д*).

Когда на вал диска полисудри накрутится весь шнурок и диск достигнет руки играющего, его опять бросают вниз. Цикл движения повторяется вновь, но уже в обратном направлении.

Особый интерес вызывает гироскопическая игрушка «тип-топ», или переворачивающийся волчок (рис. 174). Он представляет собой небольшой шарик со срезанным на высоту около половины его радиуса шаровым сегментом. По плоскости среза со сферическим основанием волчка соеди-

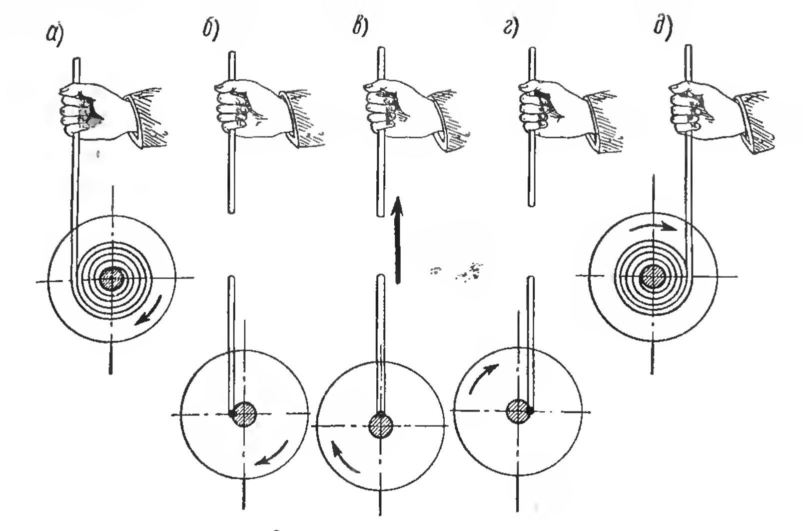


Рис. 173. Игра «полисудри».

нена цилиндрическая шейка, длина которой выходит за сферу шарика. Если такому волчку сообщить вращение с некоторой угловой скоростью Ω вокруг оси цилиндрической шейки, когда последняя направлена вертикально вверх, то волчок быстро перевернется на 180° и будет продолжать дальнейшее вращение уже на шейке [132].

Этот удивительный поворот волчка объясняется тем, что в его шейке имеется незначительная избыточная масса m (рис. 175), отстоящая от оси OA шейки на некоторое расстояние r. В силу указанного обстоятельства при вращении волчка вокруг оси OZ, с которой первоначально совмещена ось OA, возникает центробежная сила инерции, равная согласно изложенному в § 8, произведению $m\Omega^2 r$. Последняя на плече l и создает тот опрокидывающий момент $m\Omega^2 rl$, который заставляет ось OA волчка отклоняться от оси OZ его вращения. Как нетрудно убедиться, описанный

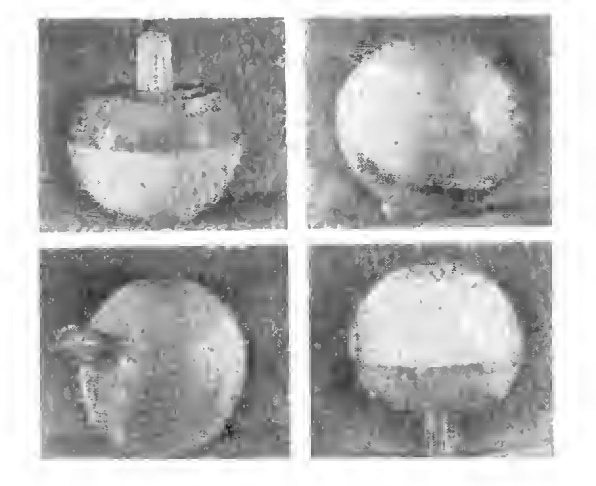


Рис. 174. Волчок «тип-топ».

опрокидывающий момент существует до тех пор, пока волчок не встанет на шейку. В этом случае масса m совместится с плоскостью опоры и величина l становится равной нулю.

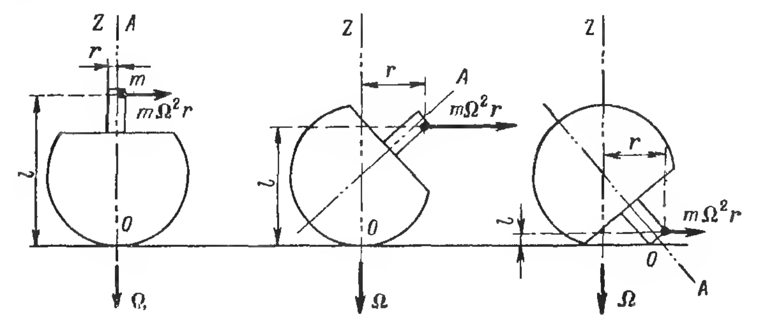


Рис. 175. Силы, действующие при вращении волчка «тип-топ».



ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И НОВЕЙШИЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

58

Поплавковые гироскопы

С целью уменьшения моментов сил трения в опорах подвеса гироскопа ротор последнего стали помещать внутри поплавка, плавающего в жидкости. В описываемой конструкции ротор P (рис. 176) вращается вокруг оси OA внутри герметически запаянной шаровой камеры BK. Сама камера подвешена в наружном кардановом кольце HK с помощью керновых опор d, обеспечивающих свободу вращения ротора вместе с камерой вокруг внутренней оси OB. Кольцо HK с помощью двух опор d устанавливается в корпусе $K\Pi$ прибора, благодаря чему гироскоп может вращаться вокруг наружной оси подвеса OC.

Для разгрузки опор подвеса корпус $K\Pi$ заполняется жидкостью, которая, занимая все свободное пространство между его внутренней поверхностью и наружной поверхностью камеры BK, поддерживает гироскоп во взвешенном состоянии. Плотность жидкости подбирают таким образом, чтобы вес ее объема, вытесняемого гироскопом, был равен весу последнего. Благодаря такой конструкции удается почти до нуля снизить нагрузку на опоры подвеса и тем самым обеспечить в них весьма малые моменты сил трения.

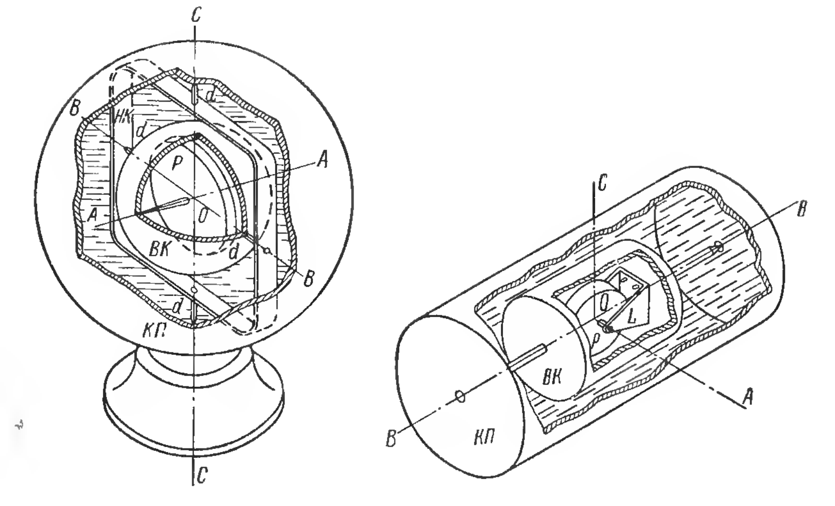


Рис. 176. Поплавковый гироскоп.

Рис. 177. Поплавковый гироскоп с двумя степенями свободы.

Особо большое распространение на практике получили поплавковые гироскопы с двумя степенями свободы. Их внутреннее карданово кольцо *ВК* (рис. 177) выполнено также в виде полой герметически запаянной камеры. Внутри такой камеры-поплавка на кронштейне *L* устанавливается с помощью подшипников ротор *P*, обладающий свободой вращения вокруг оси *OA*.

Поплавок *ВК* в свою очередь устанавливается на кернах внутри корпуса *КП* прибора. Благодаря этому поплавок вместе с ротором *P* имеет свободу вращения вокруг оси *OB* в корпусе *КП*. Между внутренней поверхностью корпуса и наружной поверхностью поплавка налита поддерживающая жидкость, плотность которой выбирается таким образом, чтобы вес поплавка уравновешивался подъемной силой жидкости. Опоры, установленные по оси

OB, при этом условии почти не несут нагрузки, благодаря чему силы трения в них практически мало отличаются от нуля.

59

Воздушный подвес гироскопа

С той же целью уменьшения вредных моментов сил трения в гироскопических приборах начали применять воздушный подвес. Принципиальное устройство такого гироскопа приведено на рис. 178. Он состоит из шара *L* диаметром 20—30 *мм*, снабженного цапфами, с помощью которых он жестко закрепляется в гирокамере *BK* на двух втулках *E*, выполненных из изоляционного материала.

Шар охватывают две полусферические чаши, которые после их соединения образуют ротор *P* гироскопа. При этом радиальный зазор между сферическими поверхностями ротора и шара выдерживается равным около 0,01 *мм*. Ротор несет на себе медную втулку *F*, являющуюся ротором однофазного электрического двигателя, статор *СГ* которого закреплен на крышке гирокамеры. С помощью этого двигателя ротору и сообщается собственное вращение вокруг оси *OD*.

Угловое рассогласование между осями *OA* ротора и *OD* гирокамеры измеряется четырьмя емкостными датчиками *ED*, расположенными попарно по двум взаимно перпендикулярным осям. Первая из них параллельна оси *OB*, вторая — оси, проходящей через точку *O* перпендикулярно к плоскости чертежа. Сигналы, снимаемые с указанных датчиков, управляют следящей системой, возвращающей камеру *BK* в положение, при котором ее ось *OD* приходит в совмещение с осью *OA* ротора.

Для изменения положения ротора в пространстве на нем установлена вторая, манганиновая, втулка *N*, вра-

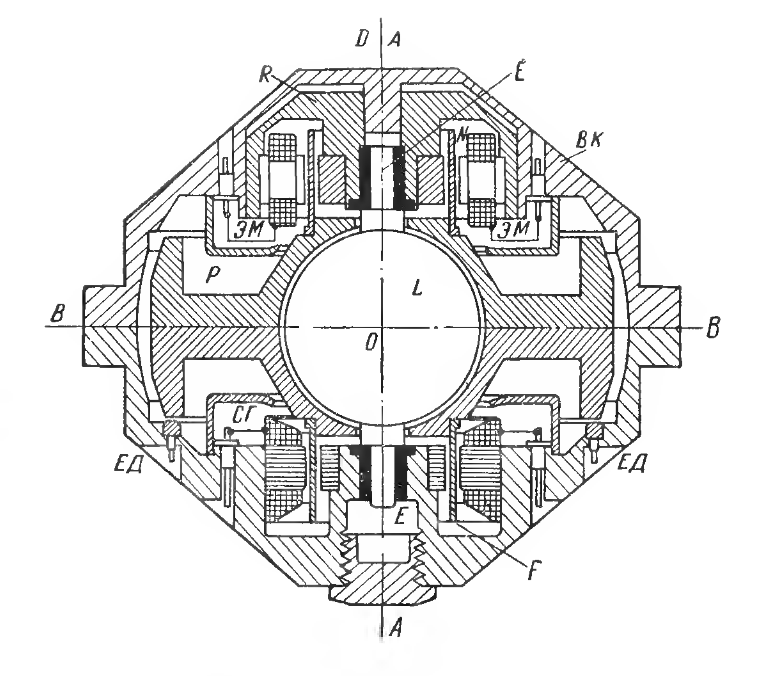


Рис. 178. Гироскоп с газовым подвесом.

щающаяся внутри ярма *R*, несущего четыре электромагнита *ЭМ*, расположенных попарно, как и датчики, по двум взаимно перпендикулярным осям. Включением соответствующих электромагнитов в цепь электрического тока создают внешние моменты, под влиянием которых ротор начинает прецессировать в нужном направлении.

60

Электростатический подвес гироскопа

Решая проблему уменьшения моментов сил трения в опорах подвеса гироскопа, специалисты разработали конструкцию электростатического подвеса ротора в корпусе прибора. Ротор *Р* такого гироскопа изготовлен из бериллия в виде тонкого полого шара, помещенного в сферическую камеру *СК* (рис. 179), стенки которой выполнены из специальной керамики, являющейся изолятором. На внутренней поверхности камеры расположены три пары чашеобразных электродов *Э*, питаемых переменным электрическим током. Оси

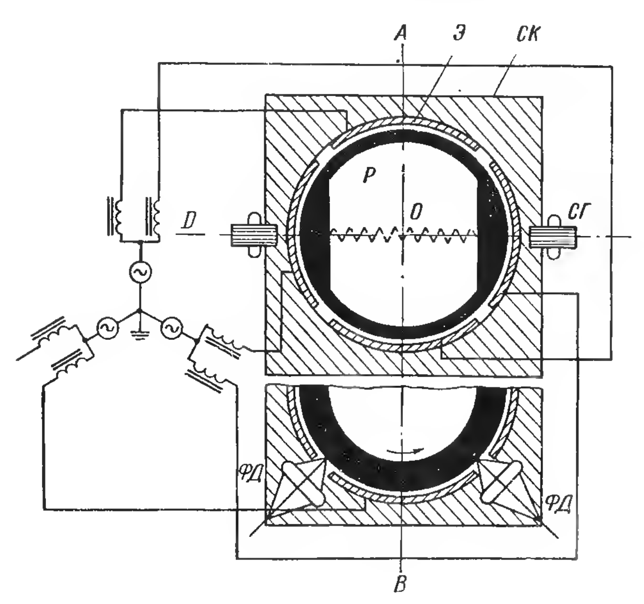


Рис. 179. Гироскоп с электростатическим подвесом.

симметрии *OA*, *OB* и *OD* каждой пары таких электродов взаимно перпендикулярны, поэтому создаваемое ими электростатическое поле удерживает центр сферического ротора в центре *O* камеры. При этом зазор между ротором и внутренней стенкой камеры составляет несколько сотых долей миллиметра.

Разгон ротора осуществляется вращающимся магнитным полем, создаваемым статором *СГ* гиромотора. После развития номинальной скорости, равной около 24 000 *об/мин*, гиромотор выключается и ротор продолжает вращаться по инерции. Благодаря высокому вакууму, поддерживаемому внутри камеры *СК*, продолжительность вращения ротора по инерции без уменьшения его угловой скорости может измеряться несколькими месяцами.

Для съема показаний прибора на наружной поверхности ротора гироскопа, по его экваториальной окружности, наносится зигзагообразная линия. Ее изображение воспринимается четырьмя фоточувствительными элементами *ФД*. При вращении экваториальной окружности ротора *Р* строго в плоскости *DOB* экватора камеры *СК* величина силы электрического тока, снимаемого с фотодатчиков *ФД*, остается постоянной. В случае же отклонения экваториальной окружности ротора от плоскости экватора камеры сила тока, вырабатываемого датчиками, начинает пульсировать, причем амплитуда ее колебаний оказывается пропорциональной углу рассогласования между экваториальными плоскостями ротора и камеры. Угловая скорость систематического отклонения такого гироскопа от первоначально заданного направления, как ожидают специалисты, не будет превышать 0,0001 *град/ч*.

61

Криогенный гироскоп

Одновременно с описанными выше в современном приборостроении разрабатываются и так называемые криогенные гироскопы. Принцип их устройства базируется на использовании явления сверхпроводимости некоторых материалов, электрическое сопротивление которых резко снижается при приближении их температуры к абсолютному нулю.

При помещении тела из сверхпроводящего материала в магнитное поле при низкой температуре на его поверхности возникают токи, препятствующие проникновению магнитного поля внутрь образца. Поэтому такое тело повиснет в магнитном поле, не требуя для своей поддержки механической опоры.

Рассматриваемый гироскоп состоит из толстостенного керамического корпуса *КП* (рис. 180) с неподвижно закрепленной в нем полой сферической камерой *СК*. Внутри камеры помещается полый сферический ротор *Р* диаметром 40 *мм*, изготовленный из титана и покрытый тонким слоем ниобия. В самом корпусе *КП* образуется глубокий вакуум и температура снижается до —269° по Цельсию.

Поддерживающее ротор магнитное поле создается электрическим током, протекающим по трем парам электрообмоток *ЭО*, ориентированных по трем взаимно перпендикулярным направлениям[1]. Кроме

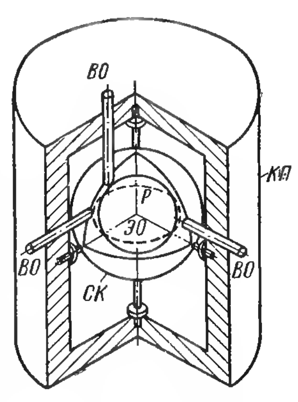


Рис 180. Криогенный гироскоп.

[1] Чтобы не усложнять схемы, на рис. 180 условно показана только одна обмотка *ЭО*.

того, прибор снабжен вторыми электрообмотками, создающими вращающееся магнитное поле, необходимое для разгона ротора при запуске прибора. Для ориентирования ротора *Р* внутри сферической камеры *СК* в период его разгона используются сигналы, снимаемые с фотоэлектрических датчиков каждого из трех оптических визиров *ВО*. Указанные сигналы, управляя током в электрообмотках, обеспечивают симметричное расположение ротора относительно оптических осей визиров *ВО*. А поскольку последние совмещены с тремя взаимно перпендикулярными направлениями, то ротор автоматически центрируется внутри камеры *СК*.

После разгона ротора оптические визиры *ВО* используются уже как датчики съема показаний криогенного гироскопа, характеризуемых углами поворота оси собственного вращения ротора внутри камеры *СК*. Так как ось собственного вращения ротора сохраняет заданное ей направление стабильным в пространстве, то любое отклонение от нее камеры *СК*, жестко связанной с подвижным объектом, будет фиксировать его отклонение от первоначального положения.

Скорость вращения ротора криогенного гироскопа достигает 20 000 *об/мин*, причем за 16 часов движения ротора по инерции существенного ее изменения не наблюдается. Конструкторы предполагают, что время вращения ротора криогенного гироскопа по инерции будет продолжаться месяцы, а возможно, и годы.

62

Вибрационный гироскоп

В процессе работы по созданию гироскопа, свободного от воздействия моментов сил трения, был создан **вибрационный гироскоп**, принцип действия которого был заимствован у дву-

крылых насекомых. По аналогии с вибрирующими жужжальцами этих насекомых (см. § 15) прибор состоит из U-образного тела, соединенного с основанием *КП* упругим стержнем *f* (рис. 181). В ветвях такого камертона электромагнитами *ЭМ* создаются встречные колебания в плоскости *DOC*. Таким образом, ветви камертона, так же как и жужжальца насекомого, непрерывно пульсируют, двигаясь с линейными скоростями v во взаимно противоположных направлениях.

Если основание *КП* колеблющегося описанным образом камертона поворачивать вокруг оси *ОС* с угловой скоростью ω, то его ветви, согласно изложенному в § 9, будут вынуждены двигаться с поворотным ускорением $w_п$. Сопротивляясь движению с поворотным ускорением, ветви камертона начнут поворачиваться вокруг оси *ОС*, закручивая стержень *f*. А поскольку изменения линейных скоростей v носят колебательный характер, то и закручивание стержня *f* будет знакопеременным. Амплитуда крутильных колебаний стержня *f* вокруг оси *ОС*, измеряемая с помощью датчика *ДУ*, и будет характеризовать величину угловой скорости ω вращения основания *КП* прибора. Значительно более эффективными являются так называемые роторные вибрационные гироскопы [17, 118, 127].

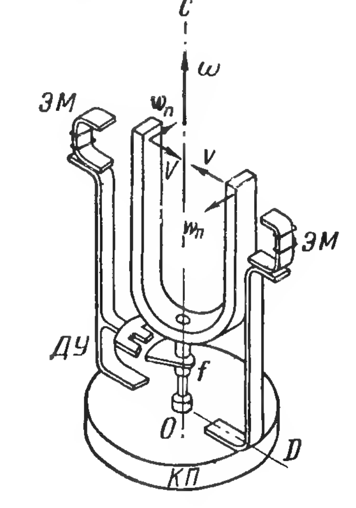


Рис. 181. Вибрационный гироскоп.

63

Гидродинамический гироскоп

Одновременно с созданием жидкостных, воздушных и других разновидностей подвеса гироскопа ведутся исследования по использованию в качестве ротора гироскопа вращающейся жидкости. Представим себе цилиндр *Ц* (рис. 182), внутренняя сферическая полость которого заполнена ртутью. В цилиндре по двум взаимно перпендикулярным плоскостям *DOB* и *DOC* имеются трубопроводы, соединяющие его сферическую полость с датчиками давления $Д_B$ и $Д_C$.

Если такой цилиндр, установленный на подшипниках в корпусе *КП* прибора, привести с помощью электрического двигателя *ЭД* во вращение вокруг оси *OD*, то вместе с ним, благодаря наличию сил вязкого трения, вокруг этой же оси *OD* будет вращаться и ртуть, заполняющая внутренние полости цилиндра. При неподвижном положении корпуса *КП* цилиндр и ртуть будут вращаться вокруг оси *OD* как одно целое с угловой скоростью Ω. При этом давление жидкости на мембраны датчиков $Д_B$ и $Д_C$ будет одинаковым и с датчиков будут сниматься нулевые показания.

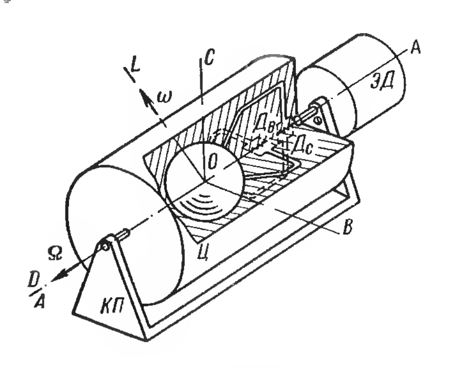


Рис. 182. Гидродинамический гироскоп.

Но как только корпусу *КП* прибора будет сообщено вращение с угловой скоростью ω вокруг какой-либо оси *OL*, не совпадающей с осью *OD*, сразу же и масса цилиндра *Ц*, и масса находящейся внутри него

ртути начнут двигаться с поворотным ускорением. Возникающий в этом случае момент гироскопической реакции массы цилиндра будет погашен реакцией опор, установленных по оси *OD*. Масса же ртути, обладающая относительно цилиндра *Ц* свободой вращения вокруг трех осей *OD*, *OB* и *OC*, стремясь сохранить положение оси *OA* собственного вращения неизменным в пространстве, начнет поворачиваться внутри цилиндра, вращаясь вокруг осей *OB* и *OC*. В результате ось *OA* ртути отклонится от оси *OD* вращения цилиндра, благодаря чему датчики $Д_B$ и $Д_C$ замерят давления, пропорциональные по величине проекциям угловой скорости ω на оси *OB* и *OC* и совпадающие по направлению с указанными проекциями.

Таким образом, гидродинамический гироскоп позволяет измерять величину и определять направление угловых скоростей поворота прибора одновременно вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные в книге примеры показывают, сколь велико значение гироскопического эффекта во всей нашей жизни. Благодаря непрерывному вращению Земли происходит смена дня и ночи, времен года и постепенное изменение климата в отдельных ее районах. Гироскопический эффект вызывает изменение рельефов берегов рек, порождает морские течения и влияет на направление ветров. Он проявляется у элементарных частиц в атомах вещества [144], при динамическом взаимодействии электрического поля с магнитными полями [111] и во многих других явлениях природы. Вот почему к изучению гироскопических явлений человечество проявляет все больший и больший интерес. Чем глубже будут изучены законы движения гироскопа, тем более ясная картина может быть составлена исследователями при изучении тех или иных явлений природы.

Гироскопический эффект позволил осуществить многие интересные машины, сложнейшие навигационные системы и автоматические устройства в различных областях техники. Его практическое использование позволило осуществить запуск искусственных спутников Земли и управление направлением движения космических кораблей при межпланетных перелетах. Только с помощью высокопрецизионных гироскопов можно будет провести эксперименты. подтверждающие теорию относительности. И еще многие насущные проблемы человечества предстоит разрешить с помощью гироскопических приборов и устройств.

ЛИТЕРАТУРА

А

Популярные книги

1 Кашеваров Ю. Б. Гироскопическое ориентирование. М. Воениздат, 1964.

2 Краснов А. И. Волчок и применение его свойств. М., ГИТТЛ, 1958.

3 Назаров Б. И. Гироскоп на ракете. М., Воениздат, 1964.

4 Николаи Е. Л. Гироскоп и некоторые его технические применения. М., Гостехиздат, 1947.

5 Перри Дж. Вращающийся волчок. Вологда, «Северный печатник», 1926.

6 Федоров Б. Ф. Оптический гироскоп. М. «Знание», 1967.

7 Холодняк А. И. Полезный волчок. М., Воениздат, 1948.

8 Lew I. Sto wcieleń żyroskopu. Warszawa, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, 1963.

Б

Книги по общей теории гироскопа и его техническому применению

9 Аранов Н. М. и Сигачев Н. Н. Гирорулевые. Л., Гидрографический отдел УМС РККА, 1935.

10 Арнольд Р. Н. и Мондер Л. Гиродинамика и ее техническое применение. М., «Машиностроение», 1964.

11 Блинов И. А. и др. Электронавигационные приборы. М., «Транспорт», 1967.

12 Богданович М. М. и Ильин П. А. Гироскопические приборы и устройства. Л., Судпромгиз, 1961.
13 Богданович М. М., Мочалин В. С. и Ильин П. А. Элементы теории навигационных гироскопических приборов. Л., «Морской транспорт», 1956.
14 Булгаков Б. В. Прикладная теория гироскопов. М., ГИТТЛ, 1955.
15 Граммель Р. Гироскоп, его теория и применение. Пер. с нем. Т. 1—2. М., ИЛ, 1952.
16 Данилин В. П. Гироскопические приборы. М., «Высшая школа», 1965.
17 Домогаров Ар. О свободном движении гироскопа СПБ. Академия наук, 1893.
18 Иконников Д. Н. Электронавигационные приборы. М., Гострансиздат, 1936.
19 Ишлинский А. Ю. Механика гироскопических систем. М., АН СССР, 1963.
20 Ковалев М. П. Опоры и подвесы гироскопических устройств. М., «Машиностроение», 1970.
21 Козлов А. С. Теория авиационных гироскопических приборов. М., Оборонгиз, 1956.
22 Крылов А. Н. и Крутков Ю. А. Общая теория гироскопов и некоторых технических их применений. Л., 1932 (АН СССР).
23 Кудревич Б. И. Теория гироскопических приборов. Т. 1—2. Л., «Судостроение», 1963—1965.
24 Мак-Клур К. Л. Теория инерциальной навигации. Пер. с англ. М., «Наука», 1964.
25 Меркин Д. Р. Гироскопические системы. М., ГИТТЛ, 1956.
26 Михайлов Д. С. Электронавигационные приборы. М., «Морской транспорт», 1944.
27 Михайлов Д. С. и Дорофеев И. Т. Электронавигационные приборы. М.—Л., Водтрансиздат, 1953.
28 Николаи Е. Л. Теория гироскопов. Л.—М., Гостехиздат, 1948.
29 Николаи Е. Л. Гироскоп в кардановом подвесе. М., «Наука», 1964.
30 Окунев Б. Н. Свободное движение гироскопа. М.—Л., Гостехиздат, 1951.
31 Ольман Е. В., Соловьев Я. И. и Токарев В. П. Автопилоты. М., Оборонгиз, 1946.
32 Павлов В. А. Авиационные гироскопические приборы. М., Оборонгиз, 1954.
33 Павлов В. А. Теория гироскопа и гироскопических приборов. Л., «Судостроение», 1964.

34 Павлов В. А., Понырко С. А. и Хованский Ю. М. Стабилизация летательных аппаратов и автопилоты. М., «Высшая школа», 1964.
35 Пельпор Д. С. Гироскопические приборы и автопилоты. М., «Машиностроение», 1964.
36 Пельпор Д. С. Теория гироскопических стабилизаторов. М., «Машиностроение», 1965.
37 Питман Д. Инерциальные системы управления. М., Воениздат, 1964.
38 Плащинский Н. К. Курс электронавигационных приборов. М., Воениздат, 1949.
39 Проблемы инерциальной навигации. М., ИЛ, 1961.
40 Проект однорельсовой жироскопической железной дороги Петроград — Гатчина. Петроград, ВСНХ, 1922.
41 Ривкин С. С. Теория гироскопических устройств. Ч. 1—2. Л., «Судостроение», 1962—1964.
42 Риглей В., Вудбери Р. и Говорка Дж. Инерциальная навигация. Пер. с англ. М., ИЛ, 1958.
43 Савант С. Дж. и др. Принципы инерциальной навигации. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
44 Саидов П. И., Слив Э. И. и Чертков Р. И. Вопросы прикладной теории гироскопов. Л., Судпромгиз, 1961.
45 Саидов П. И. Теория гироскопов. М., «Высшая школа», 1965.
46 Сергеев М. А. Наземные гирокомпасы. Л., «Машиностроение», 1969.
47 Сигачев Н. И., Глебов Е. П. и Якушенков А. А. Гирокомпасы и другие гироскопические приборы. Л., 1961 (Управление гидрографической службы ВМФ).
48 Сифф Э. Д. и Эммерич К. Л. Введение в гироскопию. Пер. с англ. М., «Машиностроение», 1965.
49 Скарборо Д. Б. Гироскоп — теория и применения. Пер. с англ. М., ИЛ, 1961.
50 Сломянский Г. А. и Прядилов Ю. Н. Поплавковые гироскопы и их применение. М., Оборонгиз, 1958.
51 Соловьев Я. И. Гироскопические приборы и автопилоты. М., Оборонгиз, 1947.
52 Топельберг Д. Г. Электронавигационные приборы. М.—Л., «Морской транспорт», 1950.
53 Ферри Э. С. Прикладная гиродинамика. М., ОНТИ, 1936.
54 Фридлендер Г. О. Инерциальные системы навигации. М., Физматгиз, 1961.
55 Фридлендер Г. О. и Козлов М. С. Авиационные гироскопические приборы. М., Оборонгиз, 1961.
56 Чистяков Н. И. Электрические авиационные приборы. М., Оборонгиз, 1950.

57 Щипанов Г. В. Гироскопические приборы слепого полета. М., Оборонгиз, 1938.
58 Якушенков А. А. Основы инерциальной навигации. М., «Морской транспорт», 1963.
59 Bogaert E. W. L'effet gyrostatique et ses aplications. Paris, 1912.
60 Carpentier I., Radix I., Bouvet I., Bonnevalle G. Navigation par inertie. Dunod, Paris, 1962.
61 Crabtree H. An elementary treatment of the theory of spinning tops and Gyroscopic Motion. New Jork, Chelsea, 1967.
62 Davidson M. The Gyroscope and its Application. New Jork, 1946.
63 Duda T. Letecke pzištroje. dil I—II. Praha, 1956.
64 Greenhill G. Gyroscopic Theory. New Jork, Chelsea, 1966.
65 Martinssen O. Technische Anwendung des Kreisels. Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik, hrsg V. Auerbach und W. Nort. Bd. 2, Lpz, 1930.
66 Rawlings A. The theory of the Gyroscopic Compass and its Deviations. New Jork, 1944.
67 Richardson K. The Gyroscope Applied. London, 1955.
68 Savet P. Gyroscopes: theory and design. New Jork, Mc. Graw-Hill book Company. 1961.

В

Книги и отдельные статьи о проявлении гироскопического эффекта, о конструкции и технологии изготовления гироскопических приборов

69 Алексеев К. Б. и Бубенин Г. Г. Управление космическим летательным аппаратом. М., «Машиностроение», 1964.
70 Андреев И. Возвратится ли бумеранг.— «Техника молодежи», 1969, № 5.
71 Бабаева Н. Ф. и др. Расчет и проектирование элементов гироскопических устройств. Л., «Машиностроение», 1967.
72 Бейн Ж. Л. Летающий поезд. «За рубежом», 1966, № 13.
73 Белькович В. и др. Инженерное искусство природы. «Техника молодежи», 1962, № 9.
74 Берг А. и Сотсков Б. Бионика. Состояние и тенденции развития. «Наука и жизнь», 1966, № 6.
75 Бонди Г. Относительность и здравый смысл. М., «Мир», 1967.
76 Браславский Д. А., Логунов С. С. и Пельпор Д. С. Расчет и конструкция авиационных приборов. М., Оборонгиз, 1954.

77 Брозгуль Л. И. и Смирнов Е. Л. Вибрационные гироскопы. М., «Машиностроение», 1970.
78 Газета «За рубежом», 1969, № 8.
79 Галаган Дж. Гироскопы, основанные на новых принципах — «Вопросы ракетной техники», 1960, № 1.
80 Гаспарянц Г. А. Устойчивость и управляемость автомобиля. М., Автотрансиздат, 1955. (Науч.-попул. б-ка автомобилиста).
81 Гироджип.— «Наука и жизнь», 1970, № 9.
82 Григалка О. Метание диска. М., «Физкультура и спорт», 1966.
83 Гэтленд К. У. Развитие управляемых снарядов. Пер. с англ. М., ИЛ, 1956.
84 Двухколесный автомобиль.— «Правда», 1970, № 76.
85 Дмитриев И. С. и Есаулов С. Ю. Системы управления одновинтовых вертолетов. М., «Машиностроение», 1969.
86 Долятовский В. А. и Пономарева И. Д. От живых организмов к автоматам. Киев. «Наукова думка», 1967.
87 Дуванин А. И. Приливы в море. Л., Гидрометеоиздат, 1960.
88 Елеонская Е. Предки современных игрушек. — «Игрушка», 1939, № 8.
89 Жолдак С. А. Технология изготовления малогабаритных гиромоторов. Л., Судпромгиз, 1961.
90 Жиробус.— Промышленно-экономическая газета, 1956, № 1.
91 Жиробус.— «Техника молодежи», 1964, № 11.
92 Жирокомпас для танков. «Красная звезда», 1939, № 170.
93 Зарафянц М. Т. Что такое энтропия. Киев—Харьков, Гостехиздат, УССР, 1935.
94 Зимелев Г. В. Теория автомобиля. М., Воениздат, 1957.
95 Калачев Г. А. Ренские колеса. М., Воениздат, 1938.
96 Катыс Г. П. Элементы систем автоматического контроля нестационарных потоков. АН СССР, 1959.
97 Келдыш М. В. Шимми переднего колеса трехколесного шасси— Труды ЦАГИ, 1945, № 564.
98 Кирпичев В. Л. Беседы о механике. М., Гостехтеориздат, 1933.
99 Ковалев В. и Ошанин С. Полет насекомых. «Наука и жизнь», 1965, № 8.
100 Ковалев М. П., Моржаков С. П. и Терехова К. С. Динамическое уравновешивание роторов гироскопических систем. М., Оборонгиз, 1962.
101 Комисар М. И. Электрические машины гироскопических систем. М., Оборонгиз, 1963.
102 Консультационный пункт.— «Семья и школа», 1969, № 9.
103 Косырев Е. Танк вчера, сегодня, завтра.— «Наука и жизнь», 1968, № 4.

104 Кудревич Б. И. Гироскопические и электронавигационные приборы в деле автоматизации кораблевождения. «Автоматика и телемеханика», 1937, № 2.
105 Лавров В. Н. Практика разработки и применения гирокомпасов в горном деле. Известия высших учебных заведений.— Приборостроение», 1961, т. 4, вып. 1.
106 Лишевский В. Внутренние силы.— «Наука и жизнь», 1965, № 6.
107 Ляпунов Б. В. Станция вне Земли. М., Воениздат, 1963.
108 Люстиберг В. В. В полете бескрылые.— «Техника молодежи», 1968, № 3.
109 Магнус Р. Установка тела. АН СССР, 1962.
110 Майоров С. А. и Сломянский Г. А. О гироскопическом эффекте при верчении шариков в шарикоподшипнике.— Известия АН СССР, ОТН, 1958, № 2.
111 Милях А. Н. Электромагнитный гироскопический эффект.— Сборник трудов Ин-та электротехники АН УССР, 1950, вып. 5.
112 Мостовенко В. В направлении главного удара. «Техника молодежи», 1963, № 9.
113 Навигация, наведение и стабилизация в космосе. М., «Машиностроение», 1970.
114 На двух колесах.— «Неделя» (воскресное прилож. к газ. «Известия»), 1961, № 24.
115 Одинцов А. А. Проектирование электроэлементов гироскопических устройств. М., «Высшая школа», 1962.
116 Орлова Е. Н. Юрацкие игрушки. «Сибирская живая старина», 1926, № 1 (5).
117 Павлов В. А. Основы конструирования гироскопических приборов. М., Оборонгиз, 1946.
118 Павлов В. А. Основы проектирования и расчета гироскопических приборов. Л., «Судостросние», 1967.
119 Павлов И. В. О возможности автоматического определения географических координат подвижных платформ.— Труды ЛИАП, 1959, вып. 28.
120 Пайил Ф. Развитие и будущее танков и бронемашин.— «Механизация и моторизация РККА», 1932, № 8.
121 Петров В. П. и Сочивко А. А. Управление ракетами. М., Воениздат, 1959.
122 По горам на двух колесах.— «За рубежом», 1970, № 22.
123 Покровский Е. А. Детские игры, преимущественно русские. М., 1887 (Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии).
124 Потапов Р. Ориентация и навигация у птиц.— «Наука и жизнь», 1966, № 9.
125 Почему я левша.— «Работница», 1968, № 7.

126 Приливы и отливы. В кн.: Большая советская энциклопедия. Изд. 2, т. 34. М., БСЭ.
127 Проблемы гироскопии. М., «Мир», 1967.
128 Романов Е. Р. Быт белоруса. Белорусский сборник. Вып. VIII, Вильна, 1912.
129 Роттенберг Р. В. и Трабская Е. Е. Экспериментальное исследование успокоения угловых колебаний пассивным гироскопом.— «Автомобильная промышленность», 1947, № 6.
130 Рыбалтовский Н. Ю., Поникаровский Г. Н. и Дорофеев И. Т. Основы кораблевождения. М., Воениздат, 1954.
131 Сборник материалов для описания местностей и племен Кавказа. Тифлис, 1886 (Издание Управления кавказского учебного округа. Вып. 5).
132 Смородинский Я. Волчок-акробат.— «Наука и жизнь», 1969, № 7.
133 Стивенс Д. Бумеранговый бум.— «Наука и жизнь», 1964, № 6.
134 Торочков В. Ю. Гироскопы в геодезии и аэросъемке. М., «Недра», 1969.
135 Торочков В. Ю. и Стомахин Л. И. Измерение параметров угловых колебаний высоких сооружений.— «Строительная механика и расчет сооружений», 1968, № 1.
136 Тутевич В. Н. Теория спортивных метаний. М., «Физкультура и спорт», 1969.
137 Хватцев М. Е. В защиту левшей.— «Здоровье», 1968, № 5.
138 Хилов К. Л. Функция органа равновесия и болезнь передвижения. Л., «Медицина», 1969.
139 Хохлов А. Ф. Теория и техническое применение автоматических устройств. М., Машгиз, 1959.
140 Чудеса техники. Спб, Изд-во Сойкина, 1911.
141 Шваиибах Б. Кое-что об автомобиле с жироскопом.— «Механизация и моторизация РККА», 1932, № 3.
142 Шварцман А. Подземные магистрали. — «Знание — сила», 1961, № 6.
143 Шульженко М. Н. и Мостовой А. С. Курс конструкции самолетов. М., Оборонгиз, 1956.
144 Щелкин К. И. Физика микромира. М., Атомоиздат, 1968.
145 Gyro assembly on welding positioner.— American machinist, 1955, N 22.
146 Hanna C. K., Lynn L. B. Gyroscope stabilizer for Tanc Guns.— Electrical Engineering, 1946, Vol. 63, N 10.
147 Mielke H. Raketentechnik. Berlin. VEB Verlag technik, 1959.
148 Smith F. Kenyon Stabilizer for Hand — Held Ortical Equipment.— Photographie Science and Engineers. 1960, Vol. 4, N 1.
149 Two — Wheeled road wonder.— Science and Mechanics, 1967, Vol. 38, N 9.

IV

Гироскоп в морском флоте

V

Гироскоп в авиации

VI

Гироскоп на транспорте

VII

Гироскоп в горном деле

VIII

Гироскоп в военном деле

IX

Гироскоп на производстве и в повседневной жизни

X

Перспективы дальнейшего использования и новейшие тенденции развития гироскопических приборов